

Carga para vehículos eléctricos pesados en México: ¿Qué podemos aprender de la experiencia global?

Autores:
Diego Suárez, Juan Roldán



Agradecimientos:

El presente documento ha sido desarrollado gracias a la colaboración internacional establecida mediante la Carta de Intención (*Letter of Intent*) firmada entre la Embajada del Reino de los Países Bajos y el Instituto Mexicano del Transporte.

Agradecemos a la Agencia Empresarial de los Países Bajos (RVO) por el financiamiento proporcionado, el cual ha sido fundamental para la materialización de esta iniciativa.

Reconocemos y valoramos las contribuciones de especialistas provenientes de la academia, el sector productivo y organizaciones no gubernamentales, quienes compartieron sus conocimientos y experiencias en temas relacionados con la descarbonización del autotransporte y la transición energética hacia ecosistemas sostenibles para vehículos eléctricos. Sus aportes, desde distintas disciplinas, fueron esenciales para construir una visión integral y aplicable frente a los desafíos y oportunidades que plantea la electrificación del transporte de largo recorrido por carretera.

Esta cooperación internacional representa un avance significativo hacia la construcción de un futuro más sostenible en el sector del transporte en México, y demuestra que el intercambio de conocimientos es una herramienta esencial para enfrentar los retos relacionados con la descarbonización y la transición energética.

Contenido

| | |
|--|----|
| 1. Resumen ejecutivo | 7 |
| 2. Introducción | 9 |
| 2.1. Objetivo del documento | 9 |
| 2.2. Contexto del proyecto | 9 |
| 2.3. Metodología empleada | 10 |
| 3. Problemática a resolver | 11 |
| 3.1. Contexto general. El desafío de los HDEV en México | 11 |
| 3.2. Contexto actual | 12 |
| 3.3. Regulación aplicable en México | 16 |
| 3.4. Incentivos | 17 |
| 4. Casos de estudio | 20 |
| 4.1. Contexto y estructura estándar | 20 |
| 4.2. Estados Unidos | 20 |
| 4.2.1. Estrategias, políticas, iniciativas y regulaciones trascendentes en Estados Unidos | 24 |
| 4.2.1.1. Programa Nacional de Infraestructura de Vehículos Eléctricos (National Electric Vehicle Infrastructure (NEVI) Program) | 24 |
| 4.2.1.2. Regulación ACT (Advanced Clean Trucks (ACT) Regulation (Conocida como California Clean Truck Act)) | 26 |
| 4.2.1.3. Regulación de Flotas Limpias Avanzadas (Advanced Clean Fleets (ACF)) | 27 |
| 4.2.1.4. Estrategia Nacional del Corredor de Carga de Cero Emisiones (National Zero-Emission Freight Corridor Strategy) | 27 |
| 4.2.2. Normativa y/o leyes clave | 28 |
| 4.2.2.1. Ley de Infraestructura Bipartidista (Bipartisan Infrastructure Law (BIL), 2021) | 28 |
| 4.2.2.2. Ley de Reducción de la Inflación (Inflation Reduction Act (IRA), 2022) | 31 |
| 4.2.3. Impacto del cambio de administración en políticas de electromovilidad: La Administración Trump y los cambios que se enfrentan | 31 |
| 4.2.3.1. Programa de Subvenciones Discrecionales para Infraestructura de Carga y Repostaje (Charging and Fueling Infrastructure (CFI) Discretionary Grant Program) | 32 |
| 4.2.3.2. Normas de Fiabilidad y Accesibilidad para la Recarga de EV (EV Charging Reliability and Accessibility Standards) | 32 |
| 4.2.3.3. SuperTruck Charge initiative | 32 |
| 4.2.3.4. Programa de Transporte Limpio (Clean Transportation Program) | 33 |
| 4.3. Unión Europea | 33 |
| 4.3.1. Estrategias, políticas, iniciativas y regulaciones trascendentes en la Unión Europea | 37 |
| 4.3.1.1. HoLa (High-Performance Charging for Long-Haul Truck Transport) | 41 |
| 4.3.1.2. Iniciativa E-Charge | 43 |
| 4.3.1.3. European Clean Transport Network (ECTN) Alliance | 44 |
| 4.3.2. El caso de los Países Bajos | 45 |
| 4.3.3. Normativa y/o leyes clave | 47 |
| 5. Interoperabilidad y estandarización | 49 |
| 5.1. Beneficios de la interoperabilidad | 49 |
| 5.2. Actores involucrados en la interoperabilidad | 50 |
| 5.3. Las cuatro interacciones de una red de carga interoperable | 52 |
| 5.4. Estándares y protocolos técnicos | 53 |
| 5.5. Interoperabilidad en los casos de estudio | 55 |
| 6. Tendencias tecnológicas | 58 |
| 6.1. Infraestructura de carga de alta potencia | 58 |

| | |
|---|-----|
| 6.2. Gestión Inteligente de la carga y optimización de la infraestructura..... | 58 |
| 6.3. Integración de la red eléctrica con vehículos (V2G)..... | 58 |
| 6.4. Interoperabilidad y Estandarización Global de Cargadores..... | 59 |
| 6.5. Integración de Energías Renovables y Almacenamiento en la Infraestructura de Carga | 59 |
| 6.6. Seguridad Operativa..... | 59 |
| 6.6.1. Elementos de diseño para mejorar la seguridad en estaciones de carga | 60 |
| 6.6.2. Normas y protocolos de seguridad..... | 61 |
| 6.6.3. Ciberseguridad | 62 |
| 7. Lineamientos y recomendaciones para diseño de estaciones de carga..... | 63 |
| 7.1. Algunas guías de diseño en el contexto estadounidense | 63 |
| 7.1.1. Consideraciones para vehículos eléctricos medianos y pesados (MD/HD EVs)..... | 66 |
| 7.1.2. Estándares generales para infraestructura de carga | 66 |
| 7.2. Información base para diseño de estaciones de carga en la UE..... | 68 |
| 8. Revisión Regional: América Latina..... | 75 |
| 8.1. Visión General | 75 |
| 8.2. Colombia..... | 75 |
| 8.3. Chile..... | 80 |
| 8.4. Costa Rica | 85 |
| 8.5. Obstáculos comunes en Latinoamérica | 87 |
| 8.6. Puntos comunes y su aplicación en la RCF..... | 89 |
| 9. Reflexiones finales, hallazgos y conclusiones preliminares..... | 92 |
| 9.1. Diferencias estructurales entre México y los casos internacionales | 92 |
| 9.2. Infraestructura: planificación, despliegue y prioridades | 93 |
| 9.3. Diseño técnico y operativo de estaciones de carga | 94 |
| 9.4. Estrategias logísticas y modelos de operación | 95 |
| 9.5. Gobernanza, coordinación y monitoreo..... | 96 |
| 9.6. Seguridad operativa, ciberseguridad y gestión de datos | 97 |
| 9.7. Red eléctrica e integración energética | 98 |
| 9.8. Mantenimiento, soporte postventa y desarrollo industrial | 99 |
| 9.9. Conclusiones y reflexiones estratégicas para México..... | 100 |
| 10. Referencias..... | 102 |

Listado de tablas

| | |
|---|----|
| Tabla 1. Datos de infraestructura de carga en México, cuarto trimestre 2024 | 14 |
| Tabla 2. Tiempo y energía necesarios para las operaciones de carga de HDEV..... | 14 |
| Tabla 3. Modelos de MHDEV disponibles para la venta en México. | 15 |
| Tabla 4. Potencia mínima proyectada de estaciones de carga pública cada 50 millas a lo largo de la NHFN..... | 25 |
| Tabla 5. Programas de la ley de infraestructura bipartidista (BIL) para vehículos eléctricos y cargadores de vehículos eléctricos para participación estatal..... | 29 |
| Tabla 6. Resumen de los requerimientos de AFIR para la infraestructura de carga de HDEV..... | 39 |
| Tabla 7. Requisitos de AFIR para la infraestructura de carga pública de HDEV por país. | 40 |
| Tabla 8. Pilotos e iniciativas para carga inteligente en los Países Bajos | 46 |
| Tabla 9. Monto máximo del subsidio AanZET y porcentaje por categoría de vehículo y tipo de empresa en 2025 | 47 |
| Tabla 10. Capas de interoperabilidad | 50 |
| Tabla 11. Diferencias principales entre OCPP y OCPI..... | 55 |
| Tabla 12. Consideraciones para la instalación de cargadores de vehículos eléctricos en Gasolineras según la guía de NYSERDA. | 64 |
| Tabla 13. Aspectos clave en el diseño de una estación de carga pública para camiones según el estudio el BMDV..... | 72 |
| Tabla 14. Resumen de normas aplicables para implementación del sistema MCS..... | 73 |
| Tabla 15. Red de ejes de transporte en territorio mexicano. | 90 |

Listado de figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1. Evolución proyectada del mercado en la electrificación del transporte. Fuente: Calstart. 12 | |
| Figura 2. Registros de vehículos eléctricos ligeros por estado a diciembre 2023. Fuente: DOE..... | 21 |
| Figura 3. Despliegue de MHDEV en USA (2015-2024). Fuente: Environmental Defense Fund..... | 22 |
| Figura 4. Estaciones de carga disponibles en Estados Unidos para vehículos eléctricos ligeros. Fuente: USDOT..... | 22 |
| Figura 5. Estaciones de carga para MHDEV en Estados Unidos. Fuente: Calstart..... | 23 |
| Figura 6. Estaciones de carga para MHDEV en la costa oeste de Estados Unidos. Fuente: Calstart. | 23 |
| Figura 7. Corredores de combustibles alternativos (AFC). Fuente: FHWA..... | 24 |
| Figura 8. Planes de implementación de California para el despliegue de infraestructura 2022-2024. Fuente: Caltrans..... | 25 |
| Figura 9. Estados que han adoptado la regulación ACT a diciembre 2024. Fuente: Electric Trucks now | 26 |
| Figura 10. Fases de implementación de la Estrategia Nacional del corredor de carga de cero emisiones. Fuente: Joint office of Energy and Transportation..... | 28 |
| Figura 11. Desarrollo trimestral del mercado Europeo de HDEV. Fuente: ICCT | 34 |
| Figura 12. Cuota de mercado de HDV por estado miembro en la UE. Fuente: ICCT..... | 34 |
| Figura 13. Ventas de ZE-HDV por estado miembro en el tercer cuatrimestre de 2024. Fuente: Elaboración propia a partir de datos del ICCT. | 35 |
| Figura 14. Mapa de centros de carga dedicados a vehículos pesados en Europa. Fuente: Gireve.36 | |
| Figura 15. Fechas de implementación del MCS en Europa por fabricante habilitado. Fuente: Gireve | 37 |
| Figura 16. Red básica de la TEN-T. Fuente: Comisión Europea..... | 38 |
| Figura 17. Puntos de carga y potencia [MW] para camiones en carretera. Fuente: Fraunhofer ISI. 41 | |
| Figura 18. Ubicaciones de los puntos de carga para el proyecto HoLa. Fuente: Fraunhofer. | 42 |
| Figura 19. Estaciones de relevo en el corredor Avignon-Lille. Fuente: Ceva Logistics..... | 44 |
| Figura 20. Actores clave involucrados en la interoperabilidad. Fuente: Adaptación a partir de información del ministerio de energía de Chile. | 51 |
| Figura 21. Directrices de diseño y ubicación para estacionamiento de flotas comerciales. Fuente: NYSERDA. | 65 |

Figura 22. Diseño hipotético de abastecimiento equipado con MCS. Fuente: Black & Veatch 67

Figura 23. Disposición de cableado para el diseño hipotético con MCS. Fuente: Black & Veatch.. 68

Figura 24. Componentes mínimos del ecosistema de carga en las estaciones de Milence. Fuente: Milence. 69

Figura 25. Propuesta de diseño estándar tipo 1 para estaciones de carga de camiones en autopistas. Fuente: Consorcio HoLa 70

Figura 26. Propuesta de diseño estándar tipo 2 para estaciones de carga de camiones en autopistas. Fuente: Consorcio HoLa 71

Figura 27. Ejes estratégicos y transversales de la ENTS. Fuente: Gobierno de Colombia. 77

Figura 28. Red de ejes de transporte en territorio mexicano. Fuente: DGST (2023) 89

Figura 29. Puntos de carga requeridas para HDEV en la RCF según criterios de AFIR y NEVI. Fuente: Elaboración propia. 91

Figura 30. Modelo para la priorización de carga en corredores de Transporte Automotor de Carga. Fuente: Elaboración propia a partir de información de Giro Zero..... 93

Listado de anexos

Anexo 1. Financiación por estados del programa NEVI para los años fiscales 2022-2026 en virtud de la ley de inversión en Infraestructura y empleo.

Notas:

La información ha sido recopilada según nuestro leal saber y entender, de acuerdo con los principios de las buenas prácticas. Los autores suponen que la información contenida en este informe es correcta, completa y actualizada, pero no aceptan ninguna responsabilidad por errores, explícitos o implícitos. Las afirmaciones contenidas en este documento no reflejan necesariamente la opinión del cliente.

1. Resumen ejecutivo

Este informe, desarrollado por NTCS Greenbee en colaboración con el Instituto Mexicano del Transporte (IMT), presenta una revisión de lineamientos, normativas y experiencias internacionales aplicables al ecosistema de carga para vehículos eléctricos pesados (en adelante HDEV por sus siglas en inglés), para su posible adaptación a la Red Carretera Federal (RCF). El documento avanza en el análisis comparativo de estándares internacionales, regionales y nacionales, identifica tendencias y actores clave e integra elementos de interoperabilidad, estandarización y seguridad operativa para sentar una base técnica y estratégica hacia la descarbonización del transporte de carga en México.

El diagnóstico señala que la adopción de HDEV enfrenta barreras críticas: insuficiencia y localización subóptima de infraestructura pública de alta potencia, ausencia de estándares técnicos consolidados e interoperables, trámites extensos para conexión a red y señales tarifarias, y coordinación institucional limitada. Dado que los *MHDV* (Medium and Heavy Duty Vehicles, por sus siglas en inglés) representan una fracción menor de la flota pero más de la mitad de las emisiones del transporte, y que la proyección sin mitigación sugiere incrementos significativos hacia 2050, la brecha de infraestructura y gobernanza se traduce en riesgos ambientales, de salud y de competitividad. Hoy predomina la carga en depósitos privados, lo que restringe la operación de largo recorrido y el escalamiento de flotas cero emisiones.

La revisión de casos en Estados Unidos, Europa y América Latina muestra que los avances sostenidos parten de entender la electromovilidad pesada como transformación estructural: gobernanza con liderazgo claro, planificación energética integrada al transporte, interoperabilidad técnica, y despliegue por corredores estratégicos con monitoreo y mejora continua. Para México, copiar modelos no es suficiente: la dependencia de tecnologías importadas y la heterogeneidad territorial y de red exigen adaptar estándares, cronogramas y diseños a condiciones locales, priorizando certidumbre técnica y operativa.

El informe explora una solución escalonada, que incluye la priorización de corredores estratégicos, donde se contemple la viabilidad operativa, el volumen de carga y la capacidad eléctrica disponible. Además, sugiere ejecutar proyectos piloto en tramos de relevancia internacional, como las conexiones hacia California y Texas, así como en corredores nacionales clave (por ejemplo, el eje Querétaro-norte, sujeto a evaluación técnica). También se plantea la creación de un ente coordinador que establezca estándares, supervise la implementación y reporte resultados comparables. Este enfoque debe considerar la selección de sitios con accesos seguros, radio de giro adecuado, espacio para expansión, y la combinación de potencias necesarias para la operación en ruta y las recargas prolongadas.

La integración energética requiere una coordinación temprana con los operadores de la red para mapear la capacidad disponible, establecer procedimientos diferenciados para la conexión de cargadores de alta potencia y evaluar la implementación de redes inteligentes, generación distribuida y almacenamiento en hubs de carga, con el fin de modular los picos de demanda.

En conjunto, esta propuesta establece un marco de acción para un escenario fragmentado, basado en el diagnóstico realizado: priorización de corredores, proyectos piloto con evaluaciones rigurosas, reglas claras de interoperabilidad y seguridad, coordinación energética y un soporte industrial y de servicios que garantice la disponibilidad y escalabilidad de la infraestructura. Los próximos pasos

incluyen la estructuración de una hoja de ruta nacional con metas, hitos y responsables para el segmento de HDEV; el lanzamiento de dos o tres pilotos de corredores con seguimiento público y criterios homogéneos de evaluación; y la emisión de lineamientos técnicos sobre interoperabilidad, ciberseguridad y señalización aplicables a la RCF. La acción es clara: pasar de iniciativas aisladas a una estrategia coordinada, medible y concreta, que posicione a México como un referente regional en electromovilidad pesada.

2. Introducción

2.1. Objetivo del documento

Este informe tiene como propósito ofrecer un análisis comparativo sobre la evolución de la infraestructura de carga para HDEV en distintas regiones del mundo, destacando modelos de implementación, normativas y estrategias que han orientado su desarrollo. A través de este análisis, se busca proporcionar información clave que oriente la planificación y toma de decisiones para la electromovilidad de vehículos pesados en el contexto mexicano.

Asimismo, el informe examina cómo diversas regiones han enfrentado desafíos técnicos, regulatorios y operativos, con el objetivo de identificar lecciones aplicables a la RCF de México. En este sentido, se enfatiza en la interoperabilidad, la estandarización y la seguridad operativa como elementos fundamentales para la integración de un ecosistema de carga eficiente y sostenible que coadyuben a la implementación de la electromovilidad para vehículos pesados en México.

A partir de estas experiencias, el informe busca trazar una línea de actuación que promueva la colaboración entre los actores clave del sector y visibilice prácticas que contribuyan al desarrollo de una red de carga eficiente, segura e interoperable para HDEV en el país.

2.2. Contexto del proyecto

México enfrenta varios desafíos en su transición hacia la movilidad eléctrica, especialmente en el transporte de carga pesada. A pesar de los avances en la adopción de vehículos eléctricos ligeros, la infraestructura disponible para HDEV, como tractocamiones y autobuses de largo recorrido, afronta retos tanto en términos de disponibilidad y ubicación como de capacidades de carga. La limitación de infraestructura representa un obstáculo considerable para la adopción generalizada de HDEV en rutas clave del país, particularmente sobre la RCF ya que *“La infraestructura actual de recarga en México está principalmente orientada a vehículos ligeros, con una presencia limitada de estaciones capaces de atender las necesidades específicas de los camiones pesados.”* (IMT, 2024).

Además de enfrentar los retos de la escasez de estaciones de carga de alta capacidad, así como su distribución a lo largo de la RCF, México aún no dispone de una normativa consolidada ni de estándares técnicos nacionales que aseguren la interoperabilidad de los sistemas de carga, lo que dificulta la integración de nuevas soluciones con la infraestructura existente y representa una barrera para la adopción de HDEV en el país.

En respuesta a esta problemática, la Comisión Reguladora de Energía (CRE) ha emitido recientemente las primeras disposiciones administrativas de carácter general en materia de infraestructura de carga para vehículos eléctricos, lo que supone un avance en la regulación del sector. No obstante, aún se requiere una mayor coordinación entre los distintos actores involucrados para desarrollar la infraestructura necesaria y fomentar la adopción de tecnologías eficientes (CRE, Gobierno de México, 2024).

A pesar de estos avances, México aún carece de un enfoque sistemático para identificar, adaptar y adoptar las mejores prácticas internacionales en infraestructura de carga para HDEV. La carencia de un mapa de ruta limita la capacidad del país para implementar tecnologías y protocolos eficientes.

2.3. Metodología empleada

Para este trabajo, se empleó una metodología basada en la revisión documental de casos de estudio internacionales y de contextos con un mayor grado de avance, con el objetivo de identificar hallazgos y herramientas útiles para el contexto mexicano.

La revisión se enfocó en países cuyas políticas, iniciativas y programas pudieran servir como referencia para diseñar un modelo adaptado a las condiciones nacionales. La selección de casos se basó en el nivel de avance observado en tres aspectos clave: regulación, interoperabilidad y despliegue tecnológico de infraestructura de carga para vehículos eléctricos pesados. Bajo estos criterios, el análisis se estructuró en torno a tres regiones clave:

América del Norte: Se eligió a Estados Unidos debido a su liderazgo en el desarrollo de estándares y regulaciones para la infraestructura de carga, así como por su influencia en el mercado mexicano. Su experiencia en la estandarización y adopción de tecnologías de carga rápida y ultrarrápida constituye un referente fundamental para este estudio.

América Latina: Se seleccionaron Costa Rica, Chile y Colombia por haber definido una Estrategia Nacional de Movilidad Eléctrica (ENME) y por su liderazgo regional en la transición hacia la movilidad eléctrica. Si bien aún no han consolidado un marco normativo estandarizado para la infraestructura de carga de HDEV, su experiencia en el desarrollo de políticas y programas permiten evaluar tendencias y mejores prácticas aplicables a México.

Europa: Con énfasis en Países Bajos, reconocido como pionero en el despliegue de infraestructura de carga para vehículos eléctricos medianos y pesados (MHDEV, por sus siglas en inglés) y en la implementación de estándares de interoperabilidad. Su enfoque en la regulación, la colaboración público-privada y la adopción de modelos financieros sostenibles lo convierten en un caso de estudio esencial en este continente.

La selección de estos países permite identificar lecciones clave y modelos replicables que pueden servir de referencia para México en la adopción de mejores prácticas. La información fue recopilada a partir de fuentes oficiales, como sitios gubernamentales y apartados de la ENME de cada país. Esta metodología busca estructurar y analizar tendencias relevantes que contribuyan a la posible estandarización y regulación nacional de la infraestructura de carga para HDEV.

3. Problemática a resolver

3.1. Contexto general. El desafío de los HDEV en México

La descarbonización del transporte pesado por carretera es un pilar fundamental en la transición hacia un sistema de movilidad sostenible y amigable con el medio ambiente. Aunque los esfuerzos globales han priorizado la electrificación de vehículos ligeros de pasajeros, la contribución desproporcionada de los vehículos medianos y pesados¹ (MHDV, por sus siglas en inglés) a las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y contaminantes atmosféricos exige una transición hacia tecnologías menos contaminantes.

En México, estos vehículos representan solo una cuarta parte de la flota (INECC, 2021), pero generan cerca de la mitad de las emisiones del sector transporte². Con una proyección de crecimiento acelerado en el parque vehicular de carga, se estima que, sin medidas de mitigación, las emisiones del sector podrían aumentar hasta en un 145% para 2050 si se comparan con los registros de 2016³, lo que agravaría los impactos ambientales y de salud pública.

La contaminación generada por los vehículos de carga, en particular las emisiones de óxidos de nitrógeno (NOx) y material particulado (PM2.5), ya ha sido vinculada a más de 32,000 muertes prematuras en el país⁴.

Ante este panorama, la electrificación del transporte de carga pesada por carretera surge como una alternativa y estrategia clave para mitigar su impacto ambiental. Sin embargo, esta transición enfrenta múltiples desafíos, entre ellos, la limitada infraestructura de carga adecuada para recorridos de larga distancia y el alto costo inicial de los vehículos eléctricos en comparación con sus homólogos de combustión interna.

Según la evolución proyectada del mercado por CALSTART (ver Figura 1), la adopción de HDEV sigue un enfoque escalonado, iniciando en segmentos con operaciones predecibles, como el transporte urbano y la distribución de última milla. A medida que la tecnología madura y se optimizan costos e infraestructura, la electrificación se expande progresivamente hacia aplicaciones más exigentes, incluyendo la carga pesada de larga distancia y maquinaria especializada. (CALSTART, 2023).

¹ Para este informe, Heavy Duty o carga pesada se refiere a vehículos con una masa superior a 12 toneladas. Medium Duty comprende vehículos entre 3.5 y 12 toneladas, y Light Duty aquellos vehículos de hasta 3.5 toneladas.

² GIZ-ICM (2021). Acciones clave para detonar la transición del transporte de carga en México. P. 52. Disponible en: <https://www.iniciativaclimatica.org/wp-content/uploads/2022/06/AccionesClave-Transición.pdf>

³ GIZ-ICM (2021). Acciones clave para detonar la transición del transporte de carga en México. P. 55. Disponible en: <https://www.iniciativaclimatica.org/wp-content/uploads/2022/06/AccionesClave-Transición.pdf>

⁴ Our World In Data (2019). Air Pollution from fossil fuels, 2015. Disponible en: <https://ourworldindata.org/grapher/pollution-deaths-from-fossil-fuels>

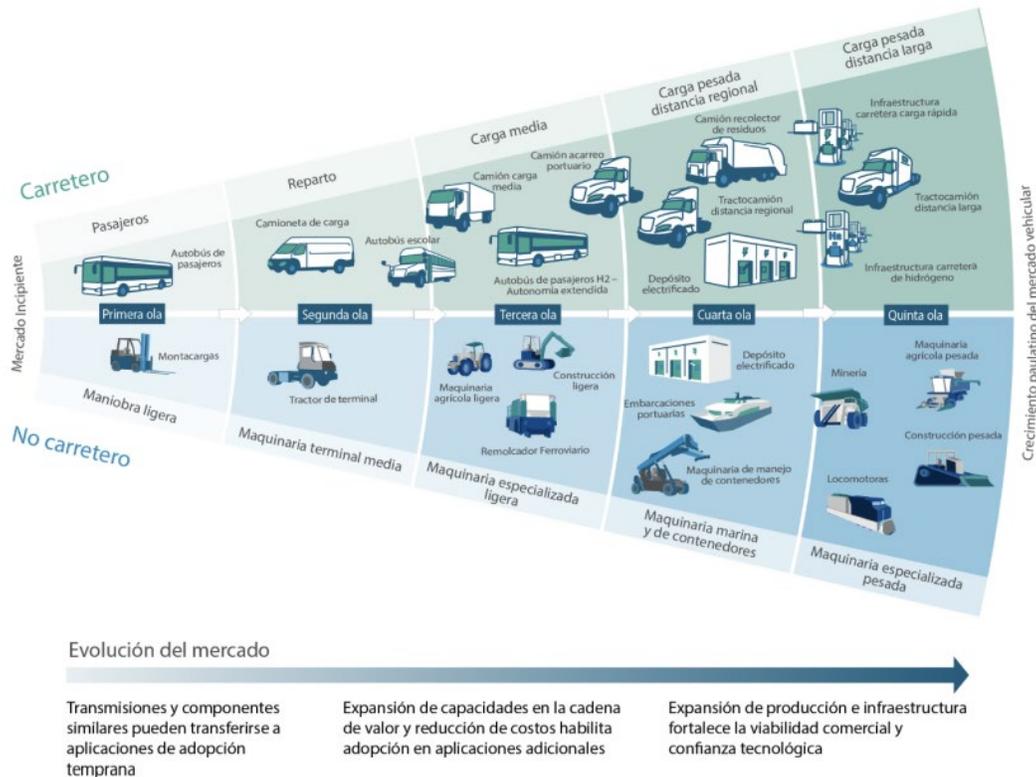


Figura 1. Evolución proyectada del mercado en la electrificación del transporte. Fuente: Calstart⁵

En este punto, no solo es fundamental comprender el funcionamiento de los HDEV, sino también comenzar a abordar los múltiples desafíos operativos que conlleva su implementación. Factores inherentes, como los tiempos de recarga, la interoperabilidad entre operadores de puntos de carga (CPOs, por sus siglas en inglés) y la gestión de rutas en función de la autonomía de los modelos disponibles, inciden directamente en la eficiencia del sistema. Por ello, una planificación y coordinación adecuadas son clave para garantizar una operación continua y evitar disrupciones previsibles que afecten la viabilidad del ecosistema de carga.

3.2. Contexto actual

En México, la electrificación del transporte ha cobrado relevancia en los últimos años, impulsada por objetivos de sostenibilidad, regulaciones ambientales, exigencias de inversionistas y la optimización de costos operativos. Sin embargo, la adopción de vehículos eléctricos comerciales ha avanzado a ritmos desiguales según el sector y el tipo de flota.

Aunque no se dispone de registros oficiales precisos sobre la cantidad de flotas eléctricas comerciales en operación, se estima que en el país circulan aproximadamente 500 camiones pesados⁶, utilizados principalmente en actividades de distribución. Asimismo, se calcula que hay alrededor de 7,500 unidades en la categoría de vehículos ligeros, como furgonetas (Latam Mobility, 2025).

⁵ Trayectorias para la adopción de ZE-MHDV en México. Disponible en: https://calstart.org/wp-content/uploads/2023/01/CALSTART_Pathways_ZEMHDV_Mexico_ES-1.pdf

⁶ Se refiere a los HDEV, sin contar Medium Duty ni los vehículos como furgonetas (o vans) que son considerados como light Duty por ser menores de 3.5 toneladas.

El año 2022 marcó un punto de inflexión en la adopción de vehículos eléctricos comerciales, con un crecimiento significativo en su adquisición, especialmente en el segmento de vehículos medianos y pesados de cero emisiones (ZE-MHDV, por sus siglas en inglés). Durante ese año, las flotas adquirieron más de 1,690 unidades a nivel nacional, impulsadas por la expansión del mercado, que pasó de menos de 10 modelos disponibles en 2021 a 36 en 2022 (CALSTART, 2025). Sin embargo, en los años posteriores, este crecimiento se desaceleró debido a diversos factores, como la oferta limitada de modelos adecuados para distintos sectores, un análisis más riguroso de la viabilidad financiera y operativa, y la decisión de muchas empresas de pausar nuevas inversiones hasta evaluar los resultados de sus primeras implementaciones (Latam Mobility, 2025).

A este panorama se suma el reto de la infraestructura de carga para HDEV. La falta de una red de carga robusta y de un marco normativo unificado ha generado un ecosistema fragmentado, en el que cada proyecto sigue criterios distintos. Esta heterogeneidad dificulta la interoperabilidad de los sistemas de carga, encarece su implementación y limita la expansión de la movilidad eléctrica en el sector del transporte de carga. Sin una estrategia clara que garantice la estandarización y el desarrollo coordinado de la infraestructura, la transición hacia la electrificación en este segmento seguirá enfrentando barreras significativas.

Uno de los principales obstáculos en el ámbito normativo es la falta de una estrategia nacional integrada que coordine los diferentes esfuerzos regulatorios. Aunque existen normas específicas para la instalación de infraestructura de carga, como la NOM-001-SEDE-2012, su aplicación aún es limitada y carece de un marco de implementación uniforme a nivel nacional.

La Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) coordinó en 2018 el desarrollo de la Estrategia Nacional de Movilidad Eléctrica (ENME) por medio de la cual se busca impulsar la transición hacia vehículos eléctricos en el país como parte de los esfuerzos para incidir en la reducción de emisiones contaminantes y de gases de efecto invernadero del sector transporte. Esta estrategia establece un marco de acción con objetivos, metas y líneas estratégicas para fomentar la adopción de la movilidad eléctrica, incluyendo incentivos económicos, desarrollo de infraestructura de recarga, fortalecimiento del marco regulatorio y promoción de la investigación e innovación tecnológica, con el propósito de alcanzar una movilidad más sostenible y contribuir a los compromisos ambientales de México. Esta iniciativa se difundió en 2023 en el Portal de la Comisión Nacional de Mejora Regulatoria (CONAMER) como Acuerdo por el que se expide la Estrategia Nacional de Movilidad Eléctrica para emisión pública de comentarios, no obstante, aún no hay fecha de publicación en el Diario Oficial de la Federación (DOF)⁷.

Esta situación evidencia la necesidad de concretar un marco normativo que establezca los requerimientos para la creación y expansión regulada de la infraestructura de carga de manera eficiente y coordinada. La estandarización y la interoperabilidad de los sistemas de carga serán aspectos clave para garantizar una transición exitosa, ya que, actualmente, la coexistencia de múltiples estándares de conectores y protocolos de carga (CCS, CHAdeMO, GB/T, entre otros) dificulta la compatibilidad y genera costos adicionales para los CPOs.

Además, la red eléctrica actual no está diseñada para soportar la demanda energética de la carga rápida de HDEV, que requiere actualizaciones significativas en materia de transformadores, líneas de distribución y sistemas de control para garantizar estabilidad y evitar sobrecargas (IMT, 2024). La

⁷ Comisión Nacional de Mejora Regulatoria [CONAMER]. (2023). Acuerdo por el que se expide la Estrategia Nacional de Movilidad Eléctrica. Sistema de Manifestación de Impacto Regulatorio. <https://www.cofemersimir.gob.mx/portales/resumen/55366#https://www.cofemersimir.gob.mx/expedientes/28310>

solución implica no solo mejoras en la infraestructura física, sino también la implementación de sistemas inteligentes de gestión de carga y la integración de fuentes de energía renovable con adecuados sistemas de almacenamiento.

En términos de infraestructura existente, el último informe trimestral de 2024 de la Electro Movilidad Asociación (EMA) reporta un total de 3,321 cargadores públicos en el país (ver Tabla 1), de los cuales solo 599 son de carga rápida en corriente continua (DC, por sus siglas en inglés). Esto representa un incremento marginal del 6.5% respecto a los 562 cargadores rápidos registrados en el tercer trimestre de 2024 (EMA, 2025).

Tabla 1. Datos de infraestructura de carga en México, cuarto trimestre 2024

| Corriente | | Total | Var. % 3T24 | Por tipo de conector | | |
|--------------------|-------------|---------------|--------------|----------------------|--------------|--------------|
| | | | | NACS/J3400 | CSS1/J1772 | GB/T |
| Red pública | | | | | | |
| DC | Ubicaciones | 199 | 6.40% | 35 | 74 | 90 |
| | Posiciones | 599 | 6.50% | 188 | 129 | 282 |
| AC | Ubicaciones | 1,105 | 0.18% | 545 | 550 | 10 |
| | Posiciones | 2,722 | 0.40% | 1,150 | 1,546 | 26 |
| Total | | 3,321 | 1.46% | 1,338 | 1,675 | 308 |
| Red privada | | | | | | |
| AC | Residencial | 34,694 | 5.44% | | 34,694 | |
| | Agencia VE | 1,445 | 5.90% | 8 | 1,437 | 0 |
| | Corporativa | 5,317 | 3.28% | 12 | 4,450 | 855 |
| DC | Agencias VE | 93 | 29% | 11 | 78 | 4 |
| | Corporativa | 185 | 18.5% | 14 | 88 | 83 |
| Total | | 41,734 | 5% | 45 | 6,053 | 942 |
| Gran total | | 45,055 | 4.98% | 1,383 | 7,728 | 1,250 |

Fuente: EMA, 2025

No obstante, el informe no especifica la potencia de estos cargadores, lo que reduce la utilidad para el análisis del segmento de HDEV, considerando que los requerimientos energéticos en carga intermedia son significativamente mayores y pueden variar en función de la estrategia u operación de carga que se utilice (Ver Tabla 2).

Tabla 2. Tiempo y energía necesarios para las operaciones de carga de HDEV.

| | Carga en depósito (nocturna) | Carga pública (nocturna) | Carga pública (Intermedia) | Carga en destino |
|---------------------------|--------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| Tiempo de carga | 8 – 10 horas | 12 horas | 45 minutos | 45 minutos |
| Potencia necesaria | 50 - 100 kW por punto de carga | 50 - 100 kW por punto de carga | 400 - 800 kW por punto de carga | 400 - 800 kW por punto de carga |

Fuente: Heliox Energy.

Hasta 2023, en México se habían vendido más de 14,000 vehículos eléctricos, de los cuales 1,736 correspondían a vehículos de carga, (INEGI, 2024), lo que representó un incremento de apenas 46 unidades de ZE-MHDEV respecto a las cifras reportadas para el 2022.

Esta baja participación en el mercado se debe principalmente a que los modelos disponibles actualmente no están diseñados para recorrer trayectos de largo alcance (más de 400 km) (ver Tabla 3), además de que la infraestructura de carga enfrenta el desafío de los llamados “desiertos de carga” (IMT, 2024).

Tabla 3. Modelos de MHDEV disponibles para la venta en México.

| OEM | Modelo | Plataforma Vehicular | Capacidad de energía | Autonomía | PBT/Longitud, clasificación | Carga |
|---------------|--------------------|----------------------|----------------------|-----------|---------------------------------|-----------|
| BYD | T4C | Camión Mediano | 63 kWh | 160 km | 4300 kg, Class 2b (US), N2(EU) | 2,010 kg |
| BYD | T45C01 | Camión Mediano | 99 kWh | 210 km | 6495 kg, Class 4 (US), N2 (EU) | 3,695 kg |
| FAW | J6F 5T | Camión Mediano | 98 kWh | 200 km | 8600 kg, Class 5 (US), N2 (EU) | 5,005 kg |
| Foton | e-S3 | Camión Mediano | 162 kWh | 217 km | 6000 Kg, Class 3 (US), N2 (EU) | 3,650 kg |
| Foton | TM3 EV | Camión Mediano | 44 kWh | 360 km | 2800 Kg, Class 2b (US), N1 (EU) | 1,540 kg |
| International | Emv Class 6 | Camión Mediano | 210 kWh | 217 km | 11793 kg, Class 6 (US) N2 (EU) | 4,990 kg |
| Megaflux | MF12T | Camión Mediano | 135 kWh | 110 km | 10400 kg, Class 6 (US), N2 (EU) | 6,800 kg |
| JAC | ex350 | Camión Mediano | 97 kWh | 200 km | 5500 kg, Class 3 (US), N2 (EU) | 2,150 kg |
| BYD | Q3MA | Camión Pesado | 422 kWh | 240 km | 47000 kg, Class 8 (US), N3 (EU) | 35,000 kg |
| International | eMV Class 7 | Camión Pesado | 210 kWh | 217 km | 14969 kg, Class 7 (US), N3 (EU) | 8,165 kg |
| Megaflux | MFT18T | Camión Pesado | 143 kWh | 145 km | 17000 kg, Class 8 (US), N3 (EU) | 11,475 kg |
| Scania | 25 P Eléctrico 4x2 | Camión Pesado | 165 kWh | 135 km | 21500 kg, Class 8 (US), N3 (EU) | 11,500 kg |
| Volkswagen | e-Delivery 4x2 | Camión Pesado | 170 kWh | 200 km | 10700 kg, Class 6 (US), N2 (EU) | 6,320 kg |
| Volkswagen | e-Delivery 6x2 | Camión Pesado | 170 kWh | 200 km | 14300 kg, Class 7 (US), N3 (EU) | 9,055 kg |

Fuente: Elaboración a partir de los datos publicados en Drive to Zero’s Zero-emission Technology Inventory (ZETI).

Un ejemplo ilustrativo de esta problemática es el corredor Ciudad de México–Guadalajara, una ruta frecuente de aproximadamente 540 kilómetros. Un camión eléctrico que opere en este trayecto necesitaría al menos una recarga intermedia, lo que incrementa los tiempos de tránsito y exige la disponibilidad de infraestructura de carga rápida en carretera. Sin una red de carga adecuada, las operaciones logísticas de larga distancia con vehículos eléctricos pesados resultan inviables.

3.3. Regulación aplicable en México

México no cuenta actualmente con una regulación específica para los HDEV ni para su infraestructura de carga. No obstante, la industria automotriz y diversas organizaciones gubernamentales han señalado la necesidad de desarrollar Normas Oficiales Mexicanas (NOM) que establezcan estándares mínimos de seguridad para los vehículos y sus componentes, regulaciones técnicas para la conversión de vehículos de combustión interna a eléctricos (retrofit) y normativas para la gestión de residuos de baterías (AMIA, 2022).

A pesar de esta ausencia de regulación específica, existen disposiciones que pueden aplicarse a la infraestructura de carga de estos vehículos. Para comprender mejor el marco normativo vigente, es fundamental distinguir entre los dos tipos de normativas en México⁸:

- **Normas Oficiales Mexicanas (NOM):** Son regulaciones técnicas de observancia obligatoria.
- **Estándares (anteriormente denominadas Normas Mexicanas (NMX)):** Son documentos técnicos de aplicación voluntaria, excepto cuando se hace referencia a estos en una NOM, momento en el que su observancia se hace obligatoria.

A continuación, se describen las normativas más relevantes en materia de infraestructura de carga para vehículos eléctricos en el país:

Normas Oficiales Mexicanas (NOM)

- **NOM-001-SEDE-2012 - Instalaciones eléctricas (utilización)**

Esta norma, en su **Artículo 625 "Equipos para carga de vehículos eléctricos"**, establece las disposiciones aplicables a los equipos eléctricos externos a un vehículo que sirven para conectarlo a un suministro de electricidad, tanto por medios conductivos como inductivos. El **Artículo 626 "Espacios electrificados para estacionamientos de camiones"** amplía estos lineamientos, definiendo requisitos específicos para la instalación de estaciones de recarga. Incluye directrices sobre ubicación de equipos, ventilación, distancias de seguridad y protecciones eléctricas. También establece requisitos para señalización de seguridad, sistemas de control y monitoreo, así como procedimientos de mantenimiento y verificación periódica.

Además, aborda la interacción con otras fuentes de generación, detallando aspectos técnicos y de seguridad para integrar sistemas de celdas de combustible con otras tecnologías como paneles solares o sistemas eólicos. También define los protocolos de comunicación y control necesarios para garantizar una operación coordinada y segura. En cuanto a los sistemas de carga, la norma especifica parámetros técnicos para corriente alterna y continua. Para corriente continua, define niveles de voltaje permitidos, protecciones necesarias y requisitos de los conductores. Para corriente alterna, establece especificaciones para inversores, sincronización con la red y protecciones específicas.

- **NOM-087-SCT-2-2017**

Regula los tiempos de conducción y pausas obligatorias para conductores de autotransporte federal, lo que incide en la planificación de infraestructura de recarga en rutas de largo recorrido.

La norma establece pausas de 30 minutos cada cinco horas de conducción y descansos

⁸ Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión. (2020). Ley de la Infraestructura de la Calidad. Diario Oficial de la Federación 1 de julio de 2020

prolongados tras jornadas de hasta 14 horas, lo que permite ubicar estaciones de carga en puntos estratégicos a lo largo de la RCF. Una planificación estructurada de estos corredores logísticos, considerando dichos lineamientos, optimizaría los tiempos de operación, minimizaría interrupciones y facilitaría la adopción de HDEV en trayectos de larga distancia, adaptando la autonomía de los vehículos con la logística del sector.

Estándares (NMX)

Los documentos técnicos (estándares) aplicables a vehículos eléctricos se listan a continuación:

- NMX-J-668/1-ANCE-2013 Vehículos eléctricos (VE) sistemas de protección personal para circuitos de alimentación parte 1: requisitos generales
- NMX-J-668/2-ANCE-2013 Vehículos eléctricos (VE) sistemas de protección personal para circuitos de alimentación parte 2: requisitos particulares para dispositivos de protección para utilizarse en sistemas de carga
- NMX-J-677-ANCE-2020 Vehículos eléctricos-equipos de alimentación
- NMX-J-678-ANCE-2020 Vehículos eléctricos-clavijas, receptáculos y acopladores.
- NMX-J-683-1-ANCE-2020 Vehículos eléctricos - clavijas, receptáculos, conectores y clavijas con brida-carga no inductiva de vehículos eléctricos-parte 1: requisitos generales
- NMX-J-683/2-ANCE-2020 Vehículos eléctricos - clavijas, receptáculos, conectores y clavijas con brida - sistemas para carga no inductiva de vehículos eléctricos - parte 2: compatibilidad dimensional y requisitos de intercambiabilidad para los accesorios de espigas y tubos de contacto en corriente alterna
- NMX-J-683-3-ANCE-2020 Vehículos eléctricos - Clavijas, receptáculos, conectores y clavijas con brida - Carga no inductiva de vehículos eléctricos - Parte 3: Requisitos de compatibilidad e intercambiabilidad dimensional para accesorios de espiga y tubo de contacto para carga de corriente continua o carga combinada de corriente alterna/corriente continua
- NMX-J-684/1-ANCE-2021 Vehículos eléctricos - sistemas para carga no inductiva de vehículos eléctricos-parte 1: requisitos generales
- NMX-J-684/21-ANCE-2021 Vehículos eléctricos-sistemas para carga no inductiva de vehículos eléctricos-parte 21: requisitos del vehículo eléctrico para conexión no inductiva a una red de alimentación en corriente alterna/corriente continua
- NMX-J-684/22-ANCE-2014 Vehículos eléctricos-sistemas para carga no inductiva de vehículos eléctricos-parte 22: estación de carga en corriente alterna para vehículos eléctricos
- NMX-J-725-1-ANCE-2016 Vehículos eléctricos-Sistemas de carga por inducción-Parte 1: Requisitos generales
- NMX-J-738-ANCE-2020 Conductores-cable de alimentación de vehículos eléctricos-especificaciones y métodos de prueba
- NMX-J-785-1-ANCE-2020 Sistema de intercambio de baterías para vehículos eléctricos-parte 1: generalidades

3.4. Incentivos

Actualmente, México ofrece incentivos fiscales para vehículos con emisiones contaminantes nulas o reducidas. Aunque no están específicamente dirigidos a los HDEV, algunos de estos podrían ser aplicables, por lo cual se listan a continuación:

- Exención del 100% del Impuesto sobre Automóviles Nuevos (ISAN) para *“la enajenación o importación definitiva de automóviles cuya propulsión sea a través de baterías eléctricas recargables, así como de automóviles eléctricos que además cuenten con motor de*

*combustión interna o con motor accionado por hidrógeno*⁹. La Ley Federal del Impuesto sobre Automóviles Nuevos (LFISAN) no solo identifica a los automóviles como aquellos vehículos con capacidad de hasta 15 pasajeros, a los cuales les aplica ciertas tasas de impuestos, sino también menciona camiones identificándolos como aquellos vehículos de carga con capacidad de hasta 4,250 kg¹⁰. A estos últimos también establece una tasa de impuesto cuando son enajenados por primera vez¹¹, sin embargo, no se encuentra en la LFISAN una exención del impuesto en caso de que sus sistemas de energía sean de tecnologías no contaminantes o menos contaminantes, como eléctricos, híbridos o que hagan uso del hidrógeno. Además, tampoco la LFISAN indica tasas de impuestos para vehículos de pasajeros de más de 15 personas ni para vehículos de carga de más de 4,250 kg, los cuales pudiesen ser de combustión interna (gasolina, diésel o gas natural comprimido, GNC, o gas licuado, GLP), eléctricos 100%, híbridos o que hagan uso hidrógeno. A diferencia de los vehículos eléctricos ligeros donde se incentiva la adquisición de estos por medio de la exención del ISAN con respecto a los de combustión interna, no hay incentivo alguno para la adquisición de vehículos pesados eléctricos con respecto a los de combustión interna, de hecho aparentemente, no se aplican impuestos de vehículos nuevos a ninguna de estas tecnologías, impidiendo acortar la brecha entre una y otra.

- Deducción fiscal hasta por \$285 MXN de pagos diarios efectuados por el arrendamiento de automóviles *“cuya propulsión sea a través de baterías eléctricas recargables, así como por automóviles eléctricos que además cuenten con motor de combustión interna o con motor accionado por hidrógeno”*.¹²
- Deducción fiscal de hasta \$250,000 MXN del Impuesto Sobre la Renta (ISR) para *“inversiones realizadas en automóviles cuya propulsión sea a través de baterías eléctricas recargables, así como los automóviles eléctricos que además cuenten con motor de combustión interna o con motor accionado por hidrógeno”*.¹³
- Crédito fiscal del 30% del ISR para inversiones en electrolineras de acceso público, acreditable por un periodo de hasta diez ejercicios fiscales continuos.¹⁴
- Por Decreto se modifica en 2020 la Tarifa de la Ley de los Impuestos Generales de Importación y dado que la producción nacional de los automóviles eléctrico era incipiente, se buscaba motivar la importación y facilitar el acceso a los consumidores de este tipo de vehículos tanto en la modalidad de pasajeros como de carga a través de la libre concurrencia y acceso de nuevas tecnologías limpias en materia de transporte. Esta acción se estableció para un periodo de cuatro años a fin de encaminar una industria nacional de

⁹ Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión. (2021). Ley Federal del Impuesto sobre Automóviles Nuevos (LFISAN). Art. 8, Fr. IV. Publicada en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 30-12-1996. Última reforma publicada en DOF el 12-11-2021.

¹⁰ Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión. (2021). Ley Federal del Impuesto sobre Automóviles Nuevos (LFISAN). Art. 5, Fr. a). Publicada en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 30-12-1996. Última reforma publicada en DOF el 12-11-2021.

¹¹ Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión. (2021). Ley Federal del Impuesto sobre Automóviles Nuevos (LFISAN). Art. 3 Fr. I y II. Publicada en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 30-12-1996. Última reforma publicada en DOF el 12-11-2021.

¹² Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión (2024). Ley del Impuesto sobre la Renta (LISR). Art. 28, Fr. XIII. Publicada en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 11-12-2013. Última reforma publicada en DOF el 01-04-2024.

¹³ Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión (2024). Ley del Impuesto sobre la Renta (LISR). Art. 36, Fr II. Publicada en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 11-12-2013. Última reforma publicada en DOF el 01-04-2024.

¹⁴ Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión (2024). Ley del Impuesto sobre la Renta (LISR). Art. 204. Publicada en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 11-12-2013. Última reforma publicada en DOF el 01-04-2024.

este tipo de vehículos. Para ello se eliminan las tarifas arancelarias que estaban entre el 20 y 15% del precio del vehículo. Esta medida culminó en septiembre de 2024.¹⁵

Es importante señalar que, aunque existen varios incentivos fiscales, estos no son exclusivos para los ZEV. Los MHDV de diésel están exentos del ISAN por diseño y pueden acceder al 70% de los reembolsos del ISR disponibles para los ZEV. Sin embargo, la disponibilidad de descuentos fiscales para vehículos diésel limita la efectividad de estos incentivos para reducir la brecha de precios entre las tecnologías diésel y las de cero emisiones (CALSTART, 2023).

Además, varios estados ofrecen exenciones del impuesto sobre la propiedad (tenencia o refrendo) para los vehículos eléctricos a batería e híbridos. En la Ciudad de México, los vehículos eléctricos e híbridos de batería están exentos del pago de tenencia, aplicable a los modelos 2025 (Gobierno de la Ciudad de México, 2025). Anteriormente, el impuesto sobre tenencia se calculaba sobre el valor del vehículo (0.245% para los de menos de 15 toneladas y 0.5% para los de entre 15 y 35 toneladas), pero esta tasa ya no aplica para vehículos híbridos y eléctricos (CALSTART, 2023). Los vehículos híbridos y eléctricos también reciben un descuento del 20% en los peajes de las autopistas de la Ciudad de México y el Estado de México.

¹⁵ Presidencia de la República (2020). Decreto por el que se modifica la Tarifa de la Ley de los Impuestos Generales de Importación y Exportación. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle_popup.php?codigo=5599614.

4. Casos de estudio

Para comprender estrategias efectivas de implementación, es fundamental analizar las iniciativas, políticas y programas desarrollados en regiones con condiciones similares o que han liderado en la adopción de infraestructura de carga. En este contexto, Estados Unidos y estados miembros de Europa occidental especialmente destacan como referentes.

En Estados Unidos, California ha liderado la electrificación del transporte mediante regulaciones ambiciosas y financiamiento estratégico, mientras que, en la Unión Europea, Países Bajos ha desarrollado un modelo eficiente de infraestructura de carga para el transporte pesado. El análisis de estos casos sirve como referencia para diseñar estrategias adaptables al mercado mexicano, facilitando así la expansión y adopción de HDEV.

4.1. Contexto y estructura estándar

Para el análisis de los casos de estudio seleccionados, se realizó una revisión documental sobre el estado actual de los MHDEV en cada país. En los casos de la Unión Europea y Estados Unidos, se revisaron las ventas y su penetración en el mercado, mientras que en los países de Latinoamérica el análisis se centró en el estado actual sobre su fase de adopción y proyectos piloto. Además, se examinaron las estrategias, políticas y regulaciones clave que impactan el desarrollo de estos vehículos en cada contexto. Cabe destacar que la infraestructura de carga, su regulación y otros factores relevantes aún se encuentran en etapas iniciales de adopción y estandarización en todos los casos analizados, por lo que podrían producirse cambios significativos a corto plazo tras la publicación de este informe.

4.2. Estados Unidos

La adopción de HDEV en Estados Unidos aún se encuentra en una fase inicial, pero muestra tendencias de crecimiento prometedoras. En 2024, las empresas estadounidenses lograron avances significativos con el despliegue de más de 15,000 vehículos eléctricos de servicio mediano y pesado (MHDEV), que incluyen semirremolques, autobuses de pasajeros y furgonetas de reparto eléctricas a batería (NREL, 2025).

Las proyecciones para los próximos años reflejan una aceleración en esta tendencia. Según ACT Research, la tasa de adopción de camiones eléctricos de batería (BEV) en la categoría de camiones Clase 8 en Norteamérica será del 1.6% en 2025, con expectativas de alcanzar el 13% para 2030 y el 29% para 2040 (ACT Research, 2024). A nivel global, el mercado de camiones eléctricos pesados fue valorado en 1.22 mil millones de dólares en 2023 y se prevé un crecimiento anual compuesto (CAGR) del 20.6% entre 2024 y 2030 (Grandview research, 2023).

Este crecimiento está impulsado por regulaciones ambientales más estrictas, avances tecnológicos en baterías, una mayor inversión en infraestructura de carga y un costo total de propiedad cada vez más competitivo. Sin embargo, la transición a los HDEV aún enfrenta desafíos significativos.

Dentro de estos retos se encuentra la incertidumbre sobre cuándo los costos de operación de los camiones eléctricos igualarán o superarán a los de sus homólogos diésel, lo cual sigue siendo un punto de inflexión para propietarios, operadores y fabricantes.

Adicionalmente, se encuentra el desarrollo de una infraestructura de carga adecuada. Muchas flotas requieren tiempos de recarga rápidos para mantener la eficiencia operativa, lo que demanda

estaciones capaces de soportar la carga simultánea de múltiples vehículos. Por ende, no solo es necesario mejorar el hardware de carga (puertos, cables y conectores), sino también fortalecer la capacidad de distribución eléctrica. A medida que la adopción de vehículos eléctricos comerciales se acelera y las tasas de carga aumentan hacia los 3.75 MW de potencia, las exigencias sobre las redes eléctricas también crecerán (NREL, 2025).

En el futuro, cuando los vehículos eléctricos constituyan la mayoría de la flota mediana y pesada en carretera, los conectores individuales deberán proporcionar varios megavatios de potencia simultáneamente, y se estima que las estaciones de carga deberán gestionar demandas superiores a los 20 MW para garantizar un suministro eficiente y confiable (NREL, 2025).

Si se contrasta el escenario actual de HDEV con los vehículos eléctricos ligeros en términos de disponibilidad de infraestructura de carga, la diferencia es notoria. El número de vehículos eléctricos registrados por estado hasta diciembre 2023 se muestra en la Figura 2.

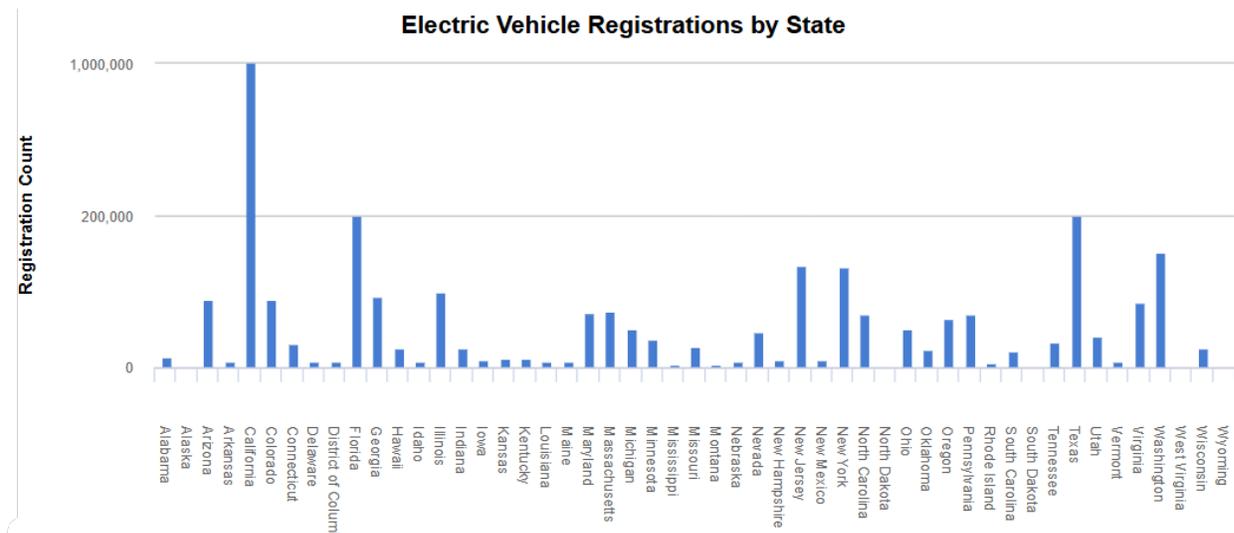


Figura 2. Registros de vehículos eléctricos ligeros por estado a diciembre 2023. Fuente: DOE¹⁶

De los 3,299,502 vehículos eléctricos ligeros registrados en Estados Unidos, California tiene la mayor cantidad de vehículos, aproximadamente el 35 % de los vehículos a nivel nacional. Florida tuvo el segundo recuento más alto con 254,878, seguido de Texas.

En contraste, el despliegue de MHDEV apenas registra 28,000 unidades desde 2015 a diciembre del 2024 (ver Figura 3).

¹⁶ Datos obtenidos por el Laboratorio Nacional de Energías Renovables (NREL). California tuvo aproximadamente 1.256.646 matriculaciones de vehículos eléctricos ligeros y Florida 254.878 en 2023. El gráfico está recortado en 250.000 para que sea más fácil ver los demás estados.

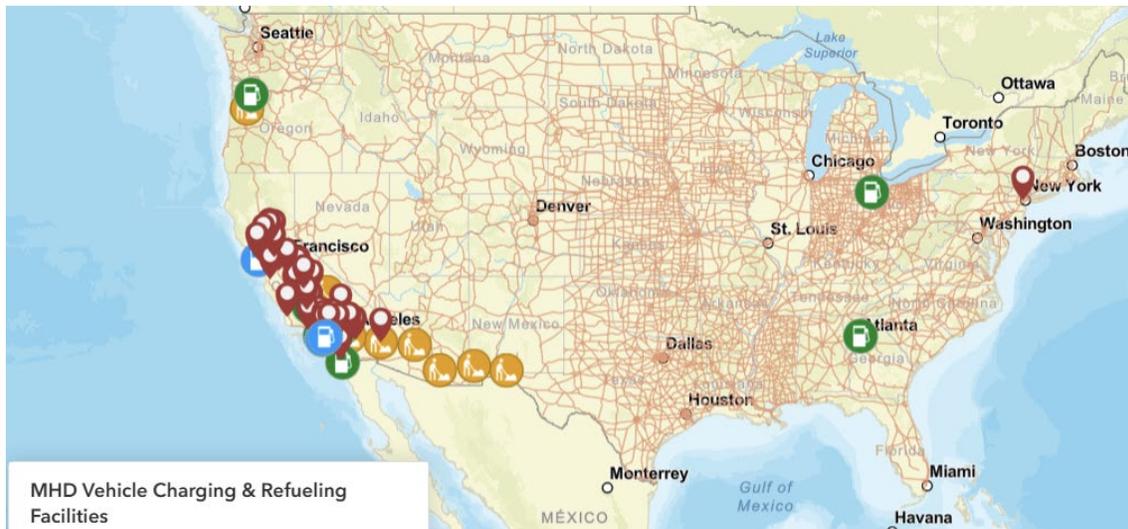


Figura 5. Estaciones de carga para MHDEV en Estados Unidos.¹⁹ Fuente: Calstart

Se observa una alta concentración de puntos en la costa oeste (ver Figura 6), mientras que el resto del país cuenta con solo unas pocas estaciones activas en Oregon, Georgia y Ohio, lo que indica que la electrificación del transporte aún enfrenta un largo camino por recorrer.

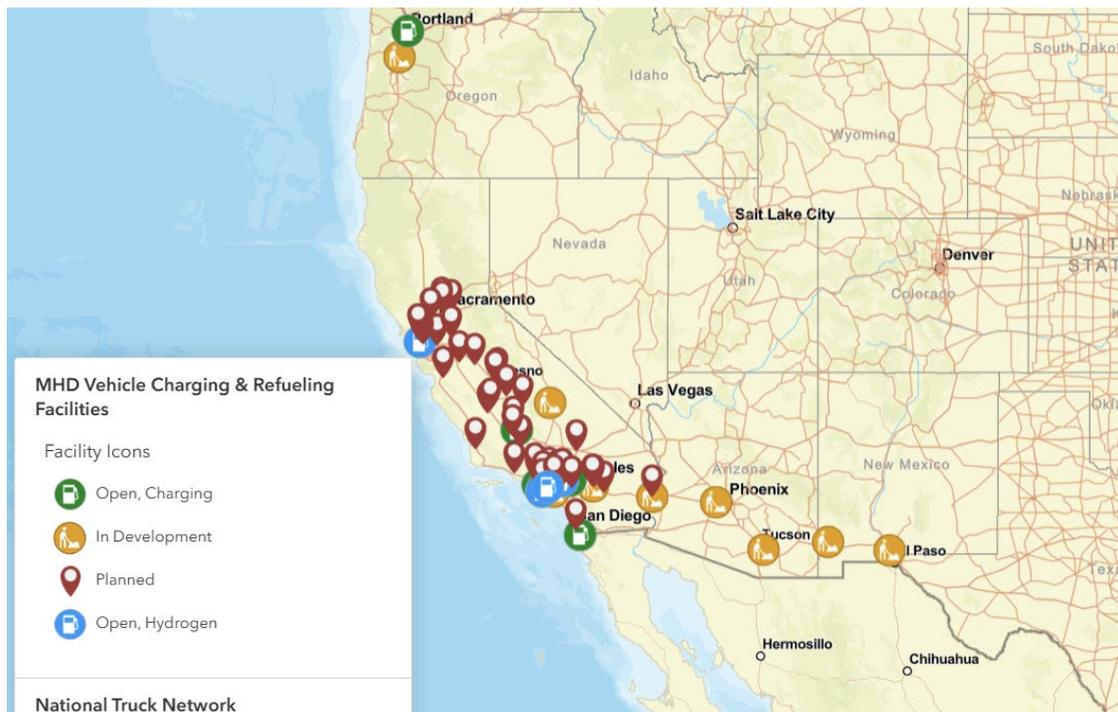


Figura 6. Estaciones de carga para MHDEV en la costa oeste de Estados Unidos. Fuente: Calstart.

¹⁹ Solo los puntos verdes están habilitados para carga de MHDEV.

4.2.1. Estrategias, políticas, iniciativas y regulaciones trascendentes en Estados Unidos

En Estados Unidos, se han implementado diversas políticas para fomentar el desarrollo de la infraestructura de carga para HDEV. Dado que cada estado cuenta con sus propias iniciativas, este análisis se centrará en las políticas y regulaciones de alcance nacional, así como en las más relevantes dentro del estado de California.

4.2.1.1. Programa Nacional de Infraestructura de Vehículos Eléctricos (National Electric Vehicle Infrastructure (NEVI) Program)

El Programa Nacional de Infraestructura de Vehículos Eléctricos (NEVI) es una iniciativa de la Administración Federal de Carreteras (FHWA) del Departamento de Transporte de los Estados Unidos (USDOT) que proporciona fondos a los estados para desplegar estratégicamente estaciones de carga de vehículos eléctricos a lo largo de los Corredores de Combustibles Alternativos (AFC) designados por la FHWA (ver Figura 7). Su objetivo es establecer una red de carga interconectada que facilite la recolección de datos, el acceso y la confiabilidad. Este programa forma parte de la Ley de Inversión en Infraestructura y Empleos (IIJA), también conocida como la Bipartisan Infrastructure Law, (BIL, por sus siglas en inglés) y está dotado con \$5,000 millones de dólares para ser distribuidos durante cinco años. (FHWA, 2025).



Figura 7. Corredores de combustibles alternativos (AFC). Fuente: FHWA

Dentro de sus consideraciones, y tras los comentarios recibidos durante su estructuración, el programa establece un mínimo de cuatro estaciones de carga de alta velocidad cada 50 millas (80 km) a lo largo de los principales corredores alineándose con los criterios de designación de AFC de la FHWA para la carga de vehículos livianos.

Este enfoque se sustenta en la proyección de que los corredores de la Red Nacional de Carreteras para el Transporte de Carga (NHFN, por sus siglas en inglés) concentrarán el 85 % de la demanda de carga de camiones de largo recorrido para 2030 (ICCT, 2023). La Tabla 4 presenta la evaluación del ICCT sobre los requisitos de capacidad de las estaciones resultantes para satisfacer las proyecciones de consumo.

Tabla 4. Potencia mínima proyectada de estaciones de carga pública cada 50 millas a lo largo de la NHFN.

| Percentil del conteo promedio anual de tráfico diario en la NHFN | Tamaño mínimo de estación en 2025 | Tamaño mínimo de estación en 2030 |
|--|-----------------------------------|-----------------------------------|
| 0 – 25% | 350 kW/estación | 1,900 kW/estación |
| 25% – 50% | 400 kW/estación | 4,300 kW/estación |
| 50% – 75% | 700 kW/estación | 7,200 kW/estación |
| >75% | 1,400 kW/estación | 13,500 kW/estación |
| Promedio nacional de la NHFN | 600 kW/estación | 6,200 kW/estación |

Fuente: ICCT

De acuerdo con las proyecciones, se necesitarán estaciones con capacidades de hasta 14 MW para 2030.

El Departamento de Transporte de California (Caltrans) es la agencia principal designada para administrar el programa NEVI, mientras que la Oficina Conjunta de Energía y Transporte (Joint Office) supervisa y aprueba los planes de implementación del programa presentados por cada estado.



Figura 8. Planes de implementación de California para el despliegue de infraestructura 2022-2024. Fuente: Caltrans

El financiamiento de NEVI se asigna siguiendo la fórmula establecida en el Título 23, Sección 104 del Código de Estados Unidos, la cual distribuye los fondos de manera proporcional según las necesidades de infraestructura de cada estado (FHWA, 2025). Para acceder a estos recursos, los estados deben presentar planes de inversión que detallen su estrategia de implementación ante la FHWA y la Joint Office. Una vez aprobados, estos planes deben actualizarse y publicarse anualmente hasta la finalización del programa en 2026 (como se aprecia en la Figura 8). Los fondos destinados para cada estado por año fiscal se encuentran en el Anexo 1.

Los proyectos financiados pueden cubrir hasta el 80% de los costos elegibles, incluyendo la compra, instalación y conexión en red de cargadores para EVs. Sin embargo, solo aquellos que cumplan con los estándares mínimos de acceso y disponibilidad pueden recibir financiamiento. Entre los requisitos clave, los cargadores deben ser de uso público, admitir múltiples métodos de pago y estar disponibles para operadores de flotas comerciales de diferentes empresas. Asimismo, los estados que completen la cobertura de sus AFC pueden proponer ubicaciones alternativas para la instalación de cargadores con el fin de expandir la infraestructura (FHWA, 2025).

Adicionalmente, el programa destina un 10% de su financiamiento anual a subvenciones estratégicas, otorgadas por el USDOT a estados y localidades que requieran asistencia adicional para la implementación de cargadores (FHWA, 2025). Estas asignaciones buscan garantizar un desarrollo equitativo y eficiente de la infraestructura de carga en todo el país.

4.2.1.2. Regulación ACT (Advanced Clean Trucks (ACT) Regulation (Conocida como California Clean Truck Act))

Adoptada inicialmente por California en 2020, establece requisitos para que los fabricantes incrementen la producción y venta de vehículos de cero emisiones (ZEV) en las categorías de vehículos medianos y pesados (MHDVs). Aunque esta regulación se originó en California, otros estados han adoptado o están en proceso de adoptar regulaciones similares.

En julio de 2020, 15 estados más el Distrito de Columbia formaron la mayor alianza nacional de la historia para abordar la contaminación de los vehículos medianos y pesados. A través de un Memorando de Entendimiento (MOU), los estados se comprometieron a alcanzar el 100 % de ventas de camiones eléctricos para 2050, con un objetivo provisional de alcanzar el 30% de ventas de vehículos de cero emisiones para 2030 (Electric Trucks Now, 2024).

Hasta mayo de 2024, 11 estados, que incluyen California, Colorado, Maryland, Massachusetts, Nueva Jersey, Nuevo México, Nueva York, Oregón, Rhode Island, Vermont y Washington, han adoptado la regulación ACT (CALSTART, 2024).

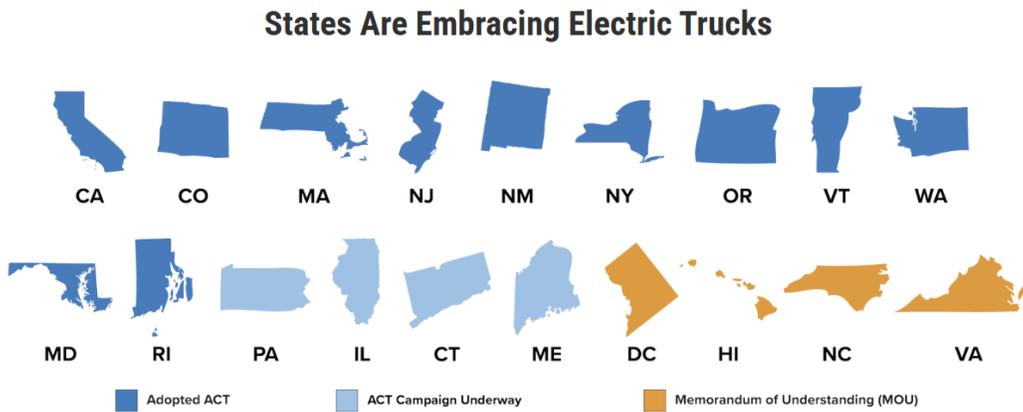


Figura 9. Estados que han adoptado la regulación ACT a diciembre 2024. Fuente: Electric Trucks now

4.2.1.3. Regulación de Flotas Limpias Avanzadas (Advanced Clean Fleets (ACF))

La Regulación de ACF es una normativa adoptada por la California Air Resources Board (CARB) para reducir las emisiones de los vehículos medianos y pesados en California. Su objetivo principal es promover la electrificación del transporte y fomentar el uso de ZEVs. Esta regulación complementa la ACT Regulation y forma parte de una estrategia más amplia para mejorar la calidad del aire y mitigar el cambio climático.

La ACF impone requisitos de transición que obligan a ciertas flotas a incorporar progresivamente vehículos de cero emisiones. Se espera que esta normativa introduzca 1,690,000 ZEVs en California para 2050, lo que generará un ahorro estimado de \$48 mil millones de dólares en costos operativos para los propietarios de flotas (California Air Resources Board, 2024). Además, a partir del año 2036, los fabricantes solo podrán producir camiones de cero emisiones.

En el contexto regulatorio, la ACF se enmarca dentro de un conjunto de políticas que buscan reducir las emisiones del sector transporte y cumplir con los objetivos climáticos de California. Se alinea con la Orden Ejecutiva N-79-20 del Gobernador, así como con el Sustainable Freight Action Plan, que promueve la eficiencia y sostenibilidad del sistema de transporte de carga. (California Air Resources Board, 2024).

4.2.1.4. Estrategia Nacional del Corredor de Carga de Cero Emisiones (National Zero-Emission Freight Corridor Strategy)

En marzo de 2024, la administración Biden-Harris presentó la Estrategia Nacional del Corredor de Carga de Cero Emisiones, desarrollada por la Joint Office of Transportation en colaboración con el USDOT, el departamento de energía (DOE), y la U.S. Environmental Protection Agency (EPA). Esta estrategia tiene como objetivo guiar el despliegue de infraestructura de carga para vehículos medianos y pesados de cero emisiones (Zero-Emission Medium- and Heavy-Duty Vehicles, ZE-MHDV) y estaciones de hidrógeno desde 2024 hasta 2040. Asimismo, busca satisfacer las demandas del mercado mediante inversiones públicas que complementen las iniciativas del sector privado, centrándose en la planificación energética y en la mejora de la calidad del aire en comunidades afectadas por emisiones diésel. (Joint Office of Energy and Transportation, 2024).

Esta estrategia se desarrolla en cuatro fases, previstas para ejecutarse en un período de 16 años a partir de 2024. Las fases resumidas se encuentran en la Figura 10.

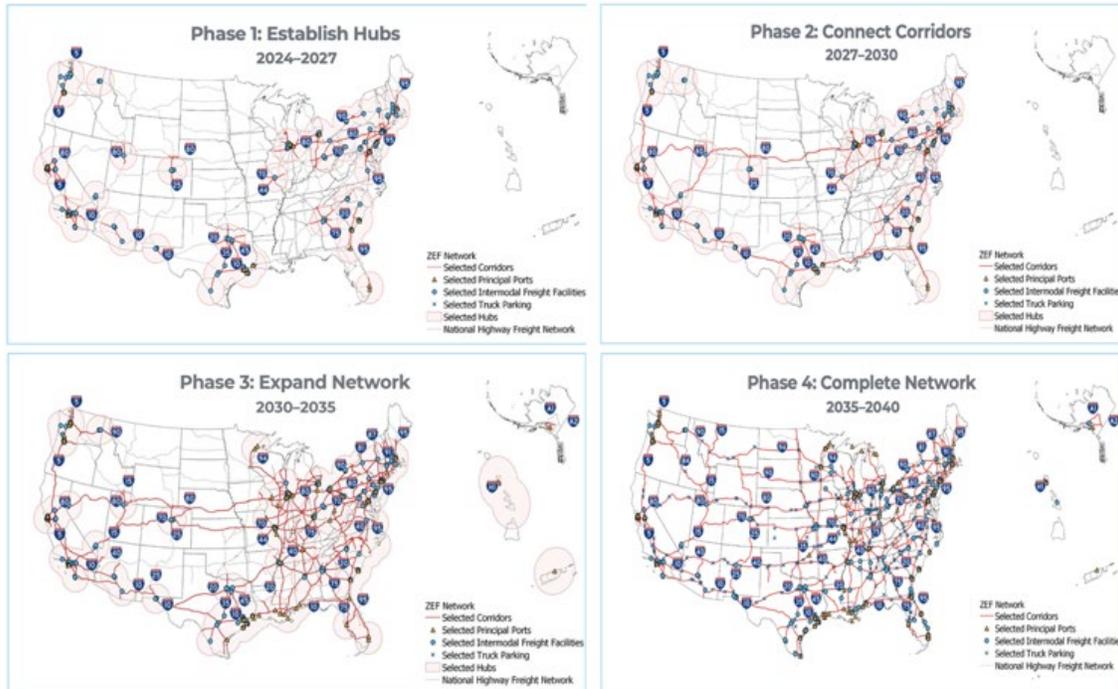


Figura 10. Fases de implementación de la Estrategia Nacional del corredor de carga de cero emisiones. Fuente: Joint office of Energy and Transportation.

4.2.2. Normativa y/o leyes clave

El desarrollo de infraestructura de carga para HDEV en Estados Unidos se ha guiado bajo dos leyes principalmente, la ley de infraestructura Bipartidista y la Ley de la Reducción de la Inflación.

4.2.2.1. Ley de Infraestructura Bipartidista (Bipartisan Infrastructure Law (BIL), 2021)

La Ley de Infraestructura Bipartidista (BIL, por sus siglas en inglés), es una legislación federal promulgada el 15 de noviembre de 2021 por el entonces presidente Joe Biden. Con una asignación de aproximadamente \$1 billón de dólares, esta ley tiene como objetivo modernizar la infraestructura de transporte, reducir la brecha digital, fortalecer la red eléctrica y fomentar comunidades más resilientes y saludables (BlueGreen Alliance, 2023).

Además, la BIL reautoriza el programa central de transporte de superficie federal, estableciendo los niveles de financiación y las directrices políticas para el período 2022-2026 (Metropolitan Transportation Commission, 2021). En este contexto, asignó \$475 mil millones para la reautorización del programa, lo que representa un aumento del 56 % en comparación con la Ley de Reparación del Transporte de Superficie de Estados Unidos (FAST) de 2015.

Adicionalmente, la BIL destinó \$157 mil millones de dólares en fondos de estímulo extraordinarios, distribuidos a nivel nacional a través de diversos programas de inversión.

Algunos de los aspectos más relevantes de la Ley de Infraestructura Bipartidista (BIL) incluyen la creación del NEVI Formula Program. Además, contempla iniciativas para el desarrollo de normas de estandarización y accesibilidad en la infraestructura de carga, promoviendo el uso del protocolo

OCPP (Open Charge Point Protocol), para garantizar la interoperabilidad. Algunos de los programas adicionales contemplados en esta ley, que han contribuido al desarrollo de la infraestructura de carga, se presentan en la Tabla 5.

Tabla 5. Programas de la ley de infraestructura bipartidista (BIL) para vehículos eléctricos y cargadores de vehículos eléctricos para participación estatal.

| Programa | Monto (USD) | Agencia encargada | Resumen |
|---|--------------------|---|---|
| <i>National Electric Vehicle Infrastructure (NEVI) Formula Program</i> | \$5,000 millones | U.S. Department of Transportation (DOT) Federal Highway Administration (FHWA) | NEVI brinda financiamiento a los estados desde los años fiscales 2022 hasta 2026 para adquirir e instalar cargadores de vehículos eléctricos con el objetivo de construir una red nacional de cargadores de vehículos eléctricos. NEVI apunta a la carga a lo largo de corredores y carreteras interestatales. |
| <i>National Alternative Fuel Corridors</i> | | FHWA | La FHWA designa una red nacional de infraestructura para recarga de vehículos eléctricos y abastecimiento de combustible de hidrógeno, propano y gas natural a lo largo de los corredores del sistema nacional de carreteras. Para designar estos corredores de combustible alternativo, la FHWA solicita nominaciones de funcionarios estatales y locales y trabaja con otros funcionarios federales y partes interesadas de la industria. |
| <i>Charging and Fueling Infrastructure Grants</i> | \$1,250 millones | FHWA | El Programa de Subvenciones para Infraestructura de Carga y Abastecimiento de Combustible ofrece fondos desde el año fiscal 2022 hasta el 2026 para instalar estaciones de carga de vehículos eléctricos y combustible alternativo en lugares de vías públicas, escuelas, parques y estacionamientos de acceso público. Estas subvenciones darán prioridad a proyectos en áreas rurales, vecindarios de ingresos bajos y moderados y comunidades con bajos índices de estacionamiento privado o altos índices de viviendas multifamiliares. |
| <i>Public Transportation Research, Demonstration, and Deployment Funding</i> | \$5,600 millones | DOT Federal Transit Administration (FTA) | Las subvenciones para autobuses de bajas o nulas emisiones brindan financiamiento de capital desde el año fiscal 2022 hasta el 2026 para ayudar a las agencias de tránsito a realizar la transición a autobuses de bajas o nulas emisiones y comprar infraestructura de abastecimiento de combustible y mantenimiento. |
| <i>Clean School Bus Program</i> | \$5,000 millones | U.S. Environmental Protection Agency (EPA) | El Programa de Autobuses Escolares Limpios proporciona fondos de subvención desde el año fiscal 2022 hasta el 2026 para autobuses escolares de cero emisiones y de bajas emisiones. |
| <i>Carbon Reduction Program</i> | \$6,400 millones | FHWA | Desde el año fiscal 2022 al 2026, los estados pueden utilizar subvenciones de fórmula a través del Programa de Reducción de Carbono para proyectos que apoyen la reducción de las emisiones del transporte. |

| | | | |
|--|------------------|---|---|
| Battery Materials Processing, Production, and Recycling Grant Program | \$3,000 millones | DOE's Office of Energy Efficiency and Renewable Energy (EERE) and Office of Manufacturing and Energy Supply Chains (MESC) | Las subvenciones para la fabricación y reciclaje de baterías están disponibles a partir del año fiscal 2022 hasta que se agoten los fondos para respaldar una cadena de suministro de baterías en América del Norte, incluidos proyectos de demostración, construcción de instalaciones a escala comercial y modernización o reequipamiento de instalaciones existentes para la fabricación de componentes de baterías, fabricación avanzada de baterías y reciclaje. |
| Battery Materials Processing Grants | \$3,000 millones | EERE and MESC | Las subvenciones para el procesamiento de materiales de baterías están disponibles a partir del año fiscal 2022 hasta que se agoten los fondos para respaldar una cadena de suministro de baterías en América del Norte, incluidos proyectos de demostración, construcción de instalaciones a escala comercial y modernización o reequipamiento de instalaciones de procesamiento de materiales de baterías existentes. |
| Electric Drive Vehicle Battery Recycling and Second-Life Applications | \$200 millones | EERE | Los fondos para el reciclaje de baterías y aplicaciones de segunda vida están disponibles a partir del año fiscal 2022 hasta que se agoten los fondos para la investigación, el desarrollo y la demostración del reciclaje de baterías de vehículos eléctricos y las aplicaciones de segunda vida para las baterías de vehículos. |

Fuente: FHWA State Planning and Funding for Electric Vehicle Charging Infrastructure.

Para la implementación de los programas de electrificación del transporte bajo la BIL hay un par de recursos relevantes.

- **EV States Clearinghouse**

Como complemento a DriveElectric.gov, la plataforma EV States Clearinghouse funciona como un punto de acceso único para las agencias estatales que planifican e implementan programas de infraestructura para vehículos eléctricos bajo el marco de la BIL.

Este portal ofrece un repositorio de documentos clave, hojas de ruta estatales sobre movilidad eléctrica y otros recursos esenciales para guiar la implementación de estos proyectos. Para acceder a la plataforma y aprovechar sus herramientas, las agencias estatales deben registrarse y obtener una cuenta gratuita.

- **Joint Office**

La Oficina Conjunta de Energía y Transporte (Joint Office) es una colaboración interinstitucional entre el Departamento de Energía (DOE) y el Departamento de Transporte (DOT) de Estados Unidos. Su misión es apoyar el desarrollo de la infraestructura necesaria para la adopción masiva de vehículos eléctricos en todo el país (US Department of Energy).

Este organismo brinda asesoramiento y asistencia técnica a múltiples programas del BIL, asegurando que la expansión de estaciones de carga y el desarrollo de infraestructura de combustible de cero emisiones se realicen de manera estratégica y equitativa.

4.2.2.2. **Ley de Reducción de la Inflación (Inflation Reduction Act (IRA), 2022)**

La Ley de Reducción de la Inflación (IRA) de 2022 representa la mayor inversión en clima y energía en la historia de Estados Unidos, con el objetivo de abordar la crisis climática, promover la justicia ambiental y fortalecer la producción nacional de energía limpia. Dentro de sus disposiciones, la IRA asigna aproximadamente \$11 mil millones de dólares a la Oficina de Programas de Préstamos (LPO, por sus siglas en inglés), ampliando su capacidad de préstamos en alrededor de \$100 mil millones de dólares. Además, establece el Programa de Reinversión en Infraestructura Energética para modernizar instalaciones energéticas obsoletas o inactivas (U.S Department of Energy, 2023).

Esta ley surge en un contexto donde la electrificación del transporte había avanzado en algunos sectores, pero menos del 0.5 % de los MHDV vendidos en 2022 fueron eléctricos (RFF, 2023). Para revertir esta tendencia, el gobierno federal implementó incentivos financieros para acelerar la transición de las flotas hacia tecnologías más limpias, impulsando la producción de vehículos eléctricos, el desarrollo de infraestructura de carga y el reciclaje de baterías.

Dentro de este marco, la IRA amplía los créditos fiscales para estaciones de carga de vehículos eléctricos, ofreciendo un incentivo del 6 % del costo total para instalaciones comerciales, con un límite de \$100,000 dólares por unidad, vigente hasta 2032 (Electrification Coalition, s.f.). Además, fomenta la producción nacional de tecnologías limpias, incentivando a empresas y operadores de flotas a invertir en la adopción de HDEV.

La ley establece incentivos fiscales para adquisición de MHDEV, con el objetivo de reducir el costo inicial y hacer más accesible su adopción por parte de empresas y flotas comerciales para operar a gran escala (RFF, 2023).

El Clean Heavy-Duty Vehicles Program también lo establece esta ley. Ofreciendo subvenciones para reemplazar camiones de combustión interna de las categorías Clase 6 y Clase 7 por ZEV. También financia la infraestructura de carga asociada, asegurando que la electrificación de las flotas sea viable desde el punto de vista operativo y logístico (US EPA, 2024).

4.2.3. **Impacto del cambio de administración en políticas de electromovilidad: La Administración Trump y los cambios que se enfrentan**

Con la llegada de la administración Trump, se han producido cambios significativos en las políticas de movilidad eléctrica en Estados Unidos. En una reciente orden ejecutiva, el presidente Trump instruyó a su administración a considerar la eliminación de subsidios y políticas que favorecen a los EVs, argumentando que representan "distorsiones de mercado impuestas por el gobierno" (Reuters, 2025). Esta directriz incluye la suspensión de desembolsos de la Ley de Reducción de la Inflación (IRA) y la Ley de Infraestructura Bipartidista (BIL), ambas fuentes clave de financiamiento para iniciativas como las que se expusieron en el apartado anterior de este informe.

Uno de los programas más afectados es NEVI, que preveía una inversión de 5,000 millones de dólares para desarrollar una red nacional de cargadores en autopistas y zonas estratégicas. El Departamento Federal de Transporte notificó a los estados la suspensión de la aprobación de planes de gasto para este programa, mientras que la FHWA revocó todas las aprobaciones previas y anunció una revisión de las políticas subyacentes (Yang, 2025).

Esta decisión genera incertidumbre sobre el futuro de la infraestructura de carga en Estados Unidos, afectando la meta previamente establecida por la administración Biden de instalar al menos 500,000 cargadores públicos para 2030. A continuación, se presentan algunos programas e iniciativas que han quedado en suspenso o cuya continuidad es incierta tras el cambio de administración.

4.2.3.1. Programa de Subvenciones Discrecionales para Infraestructura de Carga y Repostaje (Charging and Fueling Infrastructure (CFI) Discretionary Grant Program)

El CFI financia la implementación de infraestructura de carga para vehículos eléctricos y estaciones de combustible alternativo. Este programa se divide en dos enfoques principales: el primero busca instalar infraestructura en espacios públicos, como carreteras, escuelas y parques; el segundo está dirigido al desarrollo de infraestructura a lo largo de los corredores de combustibles alternativos.

Se da prioridad a zonas rurales y comunidades de bajos ingresos que cuentan con escasos espacios de estacionamiento privado. El programa recibe financiamiento de la BIL, con una asignación total de \$2,500 millones de dólares a lo largo de cinco años. Su objetivo es desplegar estratégicamente infraestructura de carga para vehículos eléctricos y proyectos de combustible alternativo, beneficiando tanto a comunidades urbanas como rurales, con especial atención a áreas desatendidas y en situación de vulnerabilidad, incluyendo centros urbanos y barrios locales (USDOT, 2024).

4.2.3.2. Normas de Fiabilidad y Accesibilidad para la Recarga de EV (EV Charging Reliability and Accessibility Standards)

En febrero de 2024, la administración Biden presentó un plan para desarrollar una red nacional de 500,000 cargadores de vehículos eléctricos, con el objetivo de estandarizar y expandir la infraestructura de carga en todo el país. Este programa proponía requisitos como la fabricación de cargadores en Estados Unidos, una fiabilidad mínima del 97%, compatibilidad con todos los vehículos eléctricos y métodos de pago unificados (Heliox-Energy, 2023).

El plan estaba respaldado por una inversión de \$7,500 millones de dólares para infraestructura de carga, además de \$10,000 millones de dólares destinados a transporte limpio y \$7,000 millones de dólares para la producción de baterías y materiales clave (Heliox-Energy, 2023).

Para garantizar una experiencia de carga confiable y accesible, el plan establecía normas que exigían que los cargadores proporcionaran información en tiempo real sobre ubicación, precios, disponibilidad y accesibilidad (Heliox-Energy, 2023). También se buscaba que los usuarios pudieran identificarse, cargar y pagar con una única aplicación, sin importar la red de carga utilizada. Además de facilitar la adopción de vehículos eléctricos, la iniciativa tenía como objetivo impulsar la electrificación del transporte pesado, promoviendo el desarrollo de una infraestructura de carga robusta y accesible para facilitar la transición hacia vehículos de cero emisiones. Esta información estaba compilada en un fact-sheet²⁰ que a la fecha se encuentra deshabilitado para consulta.

4.2.3.3. SuperTruck Charge initiative

El SuperTruck Program es una iniciativa de financiamiento del DOE destinada a desarrollar tecnologías avanzadas para camiones eléctricos de carga. Lanzado en 2009, el programa contó inicialmente con la participación de cuatro empresas del sector, que trabajaron en la creación de soluciones más eficientes para camiones de clase 8, muchas de las cuales han sido comercializadas.

En su segunda fase, SuperTruck 2, se incorporaron cinco participantes que lograron duplicar la eficiencia de estos vehículos y mejorar significativamente la eficiencia térmica de frenado del motor.

²⁰ Se recomienda verificar si el enlace está disponible para consulta en la fecha de lectura de este documento.
<https://www.whitehouse.gov/briefing-room/statements-releases/2023/02/15/fact-sheet-biden-harris-administration-announces-new-standards-and-major-progress-for-a-made-in-america-national-network-of-electric-vehicle-chargers/#:~:text=Beginning%20July%201%2C%202024%2C%20FHWA,out%20of%20this%20new%20industry.>

Actualmente, el programa está en su tercera fase con SuperTruck 3, cuyo objetivo es reducir en un 75% las emisiones de gases de efecto invernadero y contaminantes del aire en camiones medianos y pesados a lo largo de su ciclo de vida. Además, busca disminuir el costo total de propiedad de estos vehículos mediante el desarrollo de tecnologías basadas en electrificación e hidrógeno y se espera que los proyectos de esta fase concluyan en 2027 (Office of Energy Efficiency & Renewable Energy, 2025).

El 15 de enero de 2025, se anunciaron en la página del DOE los proyectos a los que el SuperTruck charge 3 había escogido para financiar. El DOE anunció una inversión de \$68 millones de dólares destinada al diseño, desarrollo y demostración de estaciones de carga innovadoras para vehículos eléctricos en puntos estratégicos como puertos clave, centros de distribución y corredores principales (Office of Energy Efficiency & Renewable Energy, 2025).

Actualmente, el enlace²¹ con la información de acceso a SuperTruck 3 está inactivo y los datos en la página del DOE ya no están disponibles para consulta. Esto genera incertidumbre sobre la financiación y continuidad de los tres proyectos previstos para ejecutarse antes de 2027.

4.2.3.4. Programa de Transporte Limpio (Clean Transportation Program)

Anteriormente conocido como el Alternative and Renewable Fuels and Vehicle Technology Program, es un programa que invierte hasta \$100 millones de dólares anualmente para acelerar el desarrollo y despliegue de vehículos de cero emisiones y su infraestructura asociada en California.

Establecido por la Assembly Bill 118 en 2007 y extendido hasta 2035 por la Assembly Bill 126, el programa es clave para alcanzar los objetivos estatales en cambio climático, calidad del aire, reducción del uso de petróleo y desarrollo económico sostenible. Administrado por la División de Combustibles y Transporte de la Energy Commission y financiado mediante tasas de registro de vehículos y embarcaciones, placas de identificación y tarifas de control de smog, el programa impulsa la creación de infraestructuras de carga y repostaje, así como el avance y adopción de vehículos de tecnologías alternativas, incluyendo MHDVs de bajas o cero emisiones (California Energy Commission, s.f.).

Además, fomenta la expansión de la producción local de combustibles renovables de bajo carbono y apoya la capacitación industrial para generar oportunidades de empleo, beneficiando especialmente a comunidades diversas, subrepresentadas y desfavorecidas. (California Energy Commission, s.f.).

4.3. Unión Europea

En la Unión Europea, la electrificación de los HDV está avanzando rápidamente, impulsada por la necesidad de alcanzar los objetivos de descarbonización del continente. Como parte de este esfuerzo, la UE se ha fijado la meta de reducir las emisiones de estos vehículos en un 45% para 2030 y lograr que al menos el 15% de la flota esté compuesta por camiones de cero emisiones. Para hacer posible esta transición, actores de gran relevancia como ENGIE, Vianeo, Circle K, y Milence²² están impulsando el desarrollo de estaciones de carga de alta capacidad, lo que permitirá un transporte de mercancías más eficiente y con un menor impacto ambiental. (EVBoosters, 2025).

En el tercer trimestre de 2024, los ZE-HDV representaron el 4% de las ventas totales de camiones, autobuses y autocares²³. Durante este periodo, se vendieron casi 2,900 unidades, distribuidas de la

²¹ Se recomienda verificar si el enlace está disponible para consulta en la fecha de lectura de este documento.

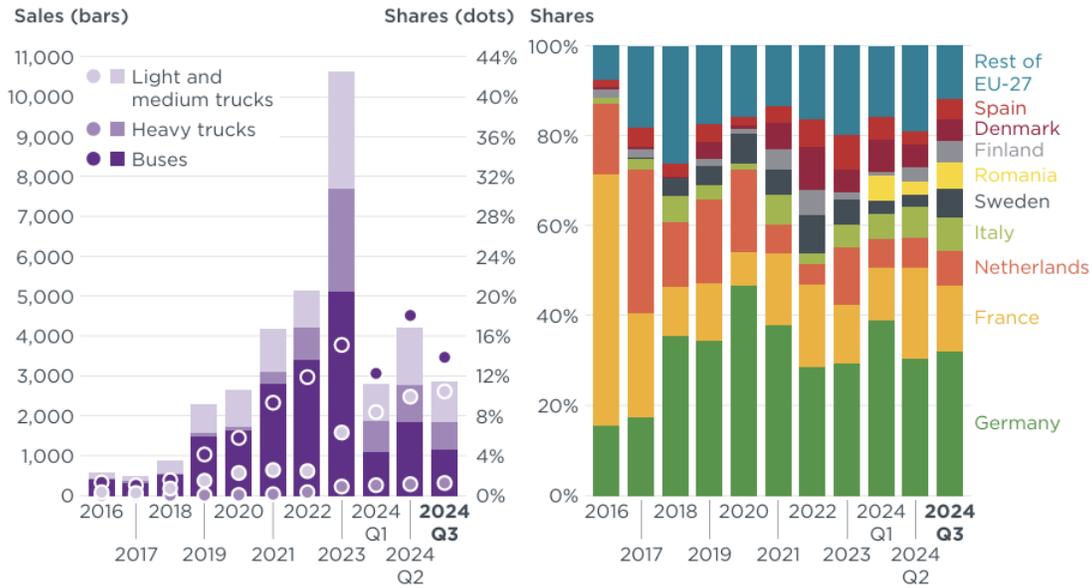
<https://www.energy.gov/articles/doe-announces-nearly-200-million-reduce-emissions-cars-and-trucks>

²² Operador de estaciones de recarga de vehículos eléctricos (CPO)

²³ Un autocar es un tipo de autobús construido para servicios de larga distancia.

siguiente manera: 700 camiones pesados (más de 12 toneladas), 1,000 camiones ligeros y medianos (menos de 12 toneladas) y 1,200 autobuses (ICCT, 2024).

A pesar de esta caída respecto a las 4,200 unidades vendidas en el trimestre anterior, la participación de camiones eléctricos ligeros y medianos siguió en ascenso, alcanzando el 10% de las ventas en el segmento de HDV en el tercer trimestre de 2024, frente al 6% registrado en 2023. La disminución general en las ventas se dio en un contexto de contracción del mercado de vehículos pesados, cuyas cifras totales bajaron de 110,000 en el segundo trimestre (la cifra más alta desde que se iniciaron estos registros) a 74,000 en el tercero, según datos del Consejo Internacional para el Transporte Limpio (ICCT, por sus siglas en inglés) (ICCT, 2024). Las ventas por año y participación de cada segmento de HDV se encuentran en la Figura 11.



THE INTERNATIONAL COUNCIL ON CLEAN TRANSPORTATION THEICCT.ORG

Figura 11. Desarrollo trimestral del mercado Europeo de HDEV. Fuente: ICCT

En la UE-27 la caída en 2024 fue especialmente pronunciada en mercados clave, con descensos del 40% en Alemania y del 38% en Italia (ICCT, 2024). La cuota de mercado total de cada estado miembro dentro de la UE en el segmento de los HDV se encuentra en la Figura 12.

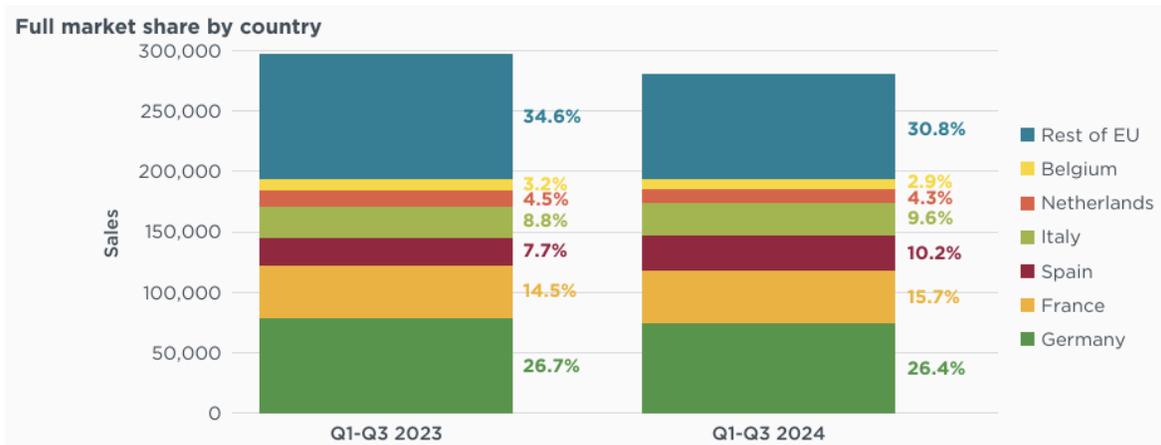


Figura 12. Cuota de mercado de HDV por estado miembro en la UE. Fuente: ICCT

En el tercer trimestre de 2024, los camiones pesados representaron el 75% de las ventas de HDV en los 27 estados miembros. De los 56,000 camiones pesados vendidos, 700 (1,2%) fueron de cero emisiones. Aunque sus ventas cayeron un 25% respecto al trimestre anterior, esto ocurrió en un contexto de contracción general del mercado, que se redujo un 32%, pasando de 83,000 a 56,000 unidades (ICCT, 2024).

A pesar de esta caída, la cuota de ZE-HDV aumentó ligeramente del 1.1% al 1.2%. En términos acumulados, las ventas de estos vehículos crecieron un 42% en los tres primeros trimestres de 2024, con 2,400 unidades matriculadas (1.2% del total), frente a las 1,700 registradas en el mismo periodo de 2023 (0.8%). El porcentaje de ventas de ZE-HDV en el tercer trimestre de 2024 por estado miembro se encuentra en la Figura 13.

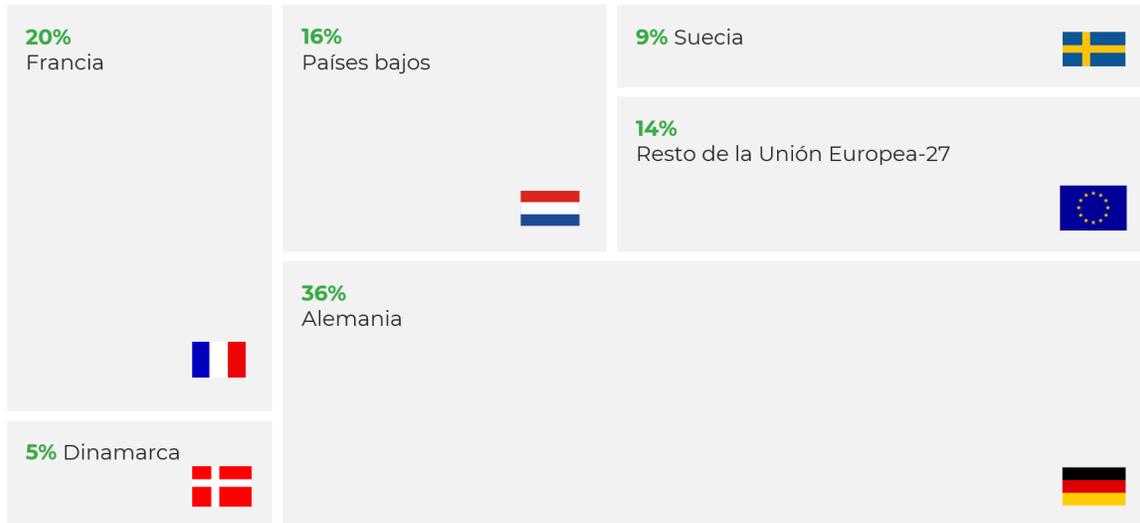


Figura 13. Ventas de ZE-HDV por estado miembro en el tercer cuatrimestre de 2024. Fuente: Elaboración propia a partir de datos del ICCT.

En términos de infraestructura de carga para HDEV, Europa cuenta con una red de carga más consolidada en comparación con Estados Unidos. A lo largo de los principales corredores logísticos, varios CPOs han desplegado estaciones específicamente para HDEV, logrando una cobertura que se extiende desde Suecia hasta el sur de Francia. Esta infraestructura de carga, dispuesta en un corredor diagonal, se muestra en la Figura 14.

Map of charging hubs dedicated to HDV in Europe

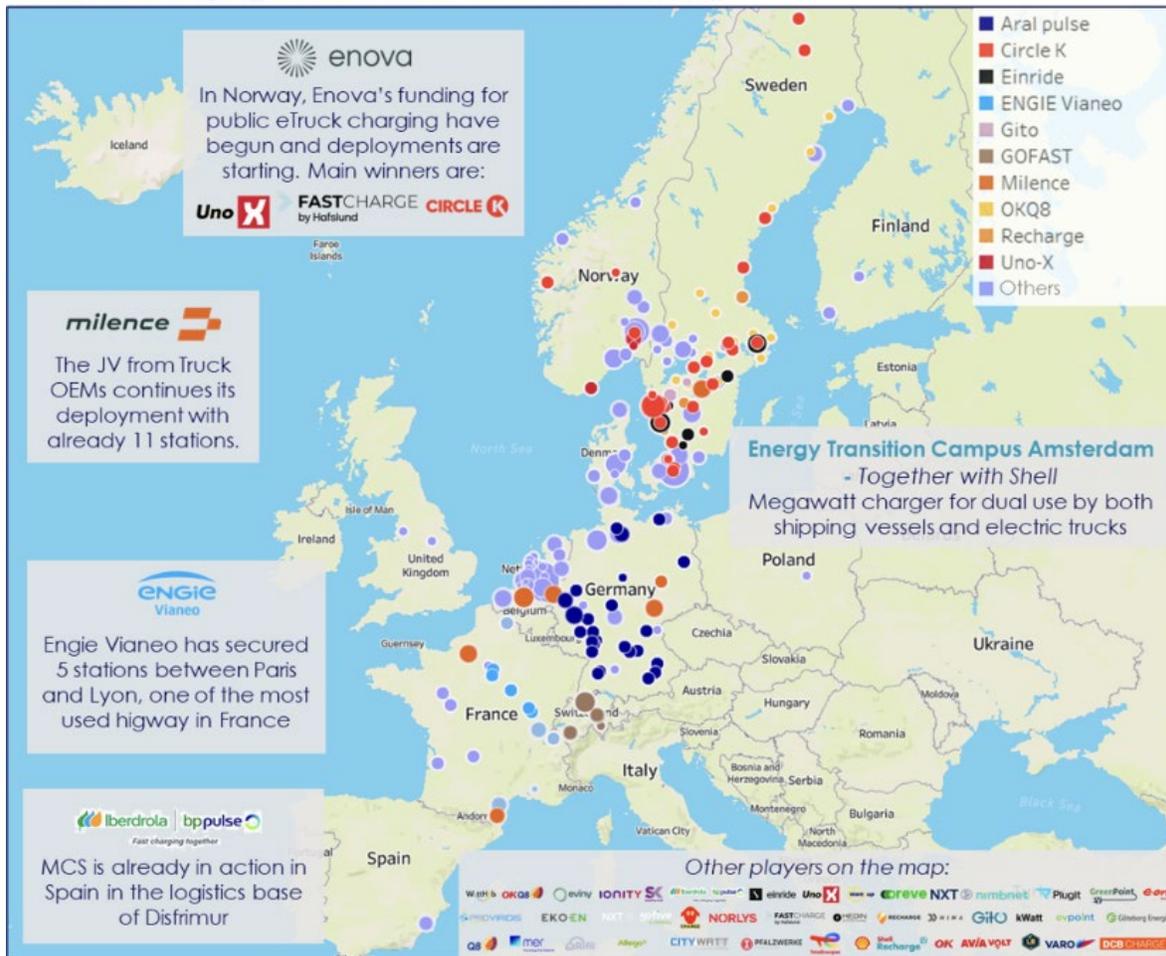


Figura 14. Mapa de centros de carga dedicados a vehículos pesados en Europa. Fuente: Gireve.

Las estaciones de carga para camiones eléctricos se ubican principalmente a lo largo de autopistas estratégicas, formando corredores diagonales que facilitan el transporte de bajas emisiones en Europa. La expansión de esta infraestructura se ha intensificado en países como Francia, Países Bajos, Alemania, Dinamarca, Suecia y Noruega, consolidando la red de carga en rutas clave (GIREVE, 2025).

Para mejorar la eficiencia y gestión del tiempo de carga, ha comenzado la implementación del Megawatt Charging System (MCS), un estándar de carga de alta potencia diseñado para vehículos eléctricos de servicio pesado, como camiones, autobuses y flotas comerciales. Actualmente, su despliegue está en fase piloto en España, Alemania, y Países Bajos, debido al limitado número de vehículos compatibles con esta tecnología.

El MCS permite suministrar hasta 3.75 MW de potencia, lo que equivale a más de diez veces la capacidad de los cargadores de corriente continua convencionales (GIREVE, 2025). Gracias a esta tecnología, es posible realizar cargas ultrarrápidas para baterías de gran capacidad, un aspecto clave para la electrificación del transporte de carga y pasajeros.

Desde el punto de vista técnico, CharIN²⁴ recomienda que el sistema opere exclusivamente bajo la norma ISO 15118-20²⁵. Según los informes, a partir de enero de 2025, los principales fabricantes de estaciones de carga ultrarrápida ya están posicionados para implementar MCS en Europa, consolidando su despliegue a gran escala. Los fabricantes que participan en el despliegue de MCS se encuentran en la Figura 15.



Figura 15. Fechas de implementación del MCS en Europa por fabricante habilitado. Fuente: Gireve

4.3.1. Estrategias, políticas, iniciativas y regulaciones trascendentes en la Unión Europea

Las normativas de la Unión Europea juegan un papel clave en la expansión de la infraestructura de carga para HDEV. En este contexto, el 25 de julio de 2023, el Consejo de la Unión Europea adoptó el Reglamento sobre la Infraestructura para los Combustibles Alternativos (AFIR)²⁶, con el objetivo de ampliar la infraestructura de recarga y repostaje de combustibles alternativos en toda Europa, promoviendo la reducción de la huella de carbono en el sector del transporte (Consejo de la Unión Europea, 2023).

Este reglamento abarca diferentes tipos de combustibles alternativos, pero en el caso de los HDEV, establece requisitos específicos para la instalación de estaciones de recarga con potencias mínimas y distancias definidas a lo largo de la red principal de la Red Transeuropea de Transporte (TEN-T). Además, su implementación está alineada con los objetivos climáticos de la UE, que buscan reducir las emisiones de los vehículos pesados en un 45 % para 2030 y en un 90 % para 2040, incentivando así inversiones en infraestructura de recarga.

²⁴ CharIN Whitepaper Megawatt Charging System (MCS). Recomendaciones y requisitos para los organismos de normalización y los proveedores de soluciones relacionados con el MCS.

²⁵ Es una actualización del estándar ISO 15118, que regula la comunicación entre vehículos eléctricos y estaciones de carga.

²⁶ REGLAMENTO (UE) 2023/1804 DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 13 de septiembre de 2023. Relativo a la implantación de una infraestructura para los combustibles alternativos y por el que se deroga la Directiva 2014/94/UE. (Se puede consultar en: <https://www.boe.es/doue/2023/234/L00001-00047.pdf>).

En este marco, el Reglamento AFIR establece objetivos clave para la electrificación y el desarrollo de infraestructura de carga, entre los cuales se destacan:

- **Para vehículos ligeros (particulares y furgonetas):** A partir de 2025, se deben instalar estaciones de recarga rápida de al menos 150 kW cada 60 km en los principales corredores de transporte de la UE, conocidos como la TEN-T (ver Figura 16).
- **Para vehículos pesados (camiones y autobuses):** A partir de 2025, se deben establecer estaciones de recarga con una potencia mínima de 350 kW cada 60 km en la red básica de la TEN-T y cada 100 km en la red global de la TEN-T. Se espera una cobertura completa para 2030.
- **Estaciones de repostaje de hidrógeno:** Para 2030, deben estar disponibles en todos los nodos urbanos y cada 200 km en la red básica de la TEN-T.

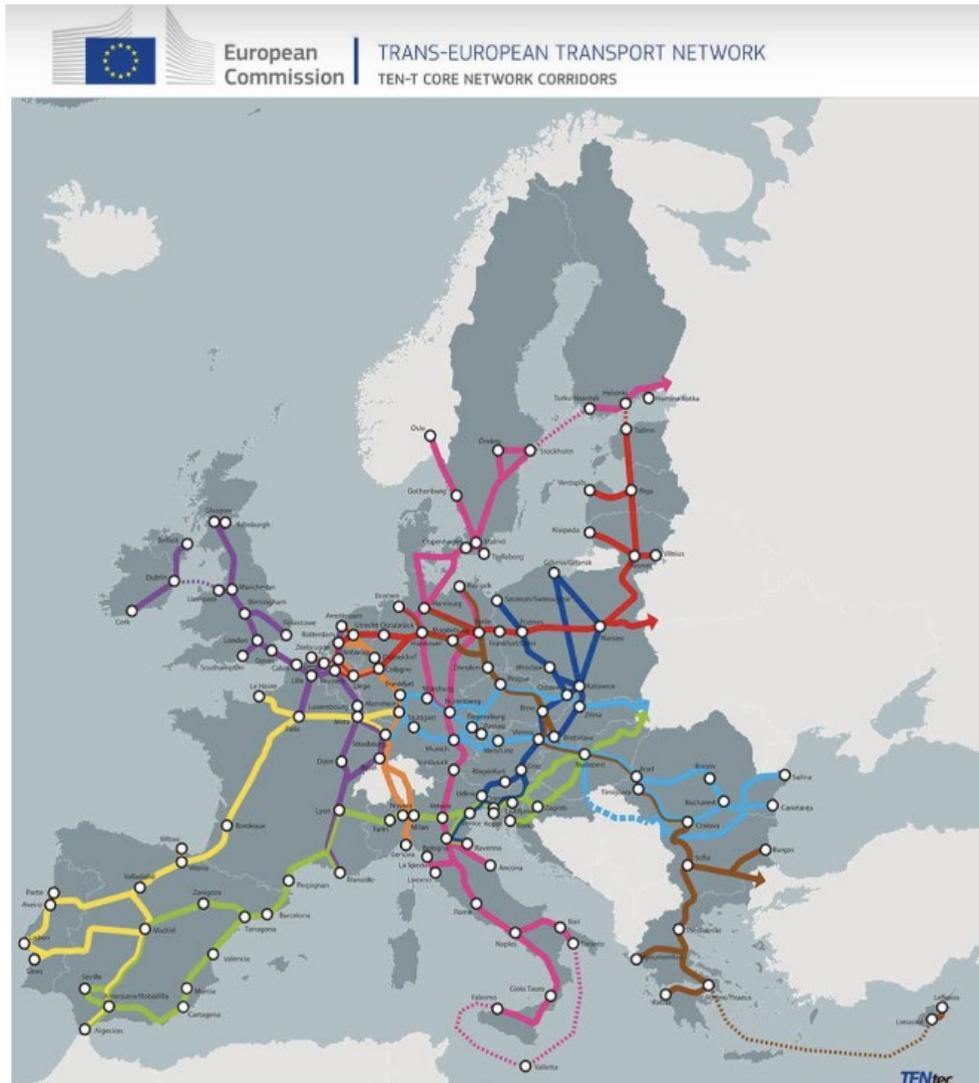


Figura 16. Red básica de la TEN-T. Fuente: Comisión Europea.

- **Suministro de electricidad en puertos y aeropuertos:** Los puertos marítimos que reciban un número mínimo de grandes buques de pasaje o portacontenedores deberán suministrar electricidad en puerto a dichos buques para 2030. Los aeropuertos deben proporcionar

electricidad a las aeronaves estacionadas en las puertas para 2025 y en los puestos de estacionamiento remotos para 2030.

- **Facilidad de pago y transparencia:** Los usuarios de vehículos eléctricos o de hidrógeno deben poder pagar fácilmente en los puntos de recarga o repostaje sin necesidad de suscripción, utilizando tarjetas de pago o dispositivos sin contacto. Los precios deben ser totalmente transparentes.
- **Información al consumidor:** Los operadores de los puntos de recarga o repostaje deben proporcionar información completa a través de medios electrónicos sobre la disponibilidad, el tiempo de espera y el precio en diferentes estaciones.

El resumen de los requerimientos de AFIR para el despliegue de la infraestructura de carga a nivel general con horizonte al 2030 se encuentra en la Tabla 6.

Tabla 6. Resumen de los requerimientos de AFIR para la infraestructura de carga de HDEV.

| | Final 2025 | Final 2027 | Final 2030 |
|--|--|--|---|
| Red básica | Ubicación de carga cada 120 km en al menos el 15% de la red en cada dirección. - Al menos 1.4 MW en total. - 1 Punto de carga de 350 kW como mínimo. | Ubicación de carga cada 120 km en al menos el 50% de la red en cada dirección. - Al menos 2.8 MW en total. - Al menos 2 puntos de mínimo 350 kW. | Ubicación de carga cada 60 km de la red en cada dirección. - Al menos 3.6 MW en total. - Al menos 2 puntos de mínimo 350 kW. |
| Red global | Ubicación de carga cada 100 km en al menos el 15% de la red en cada dirección. - Al menos 1.4 MW en total. - 1 Punto de carga de 350 kW como mínimo. | Ubicación de carga cada 100 km en al menos el 50% de la red en cada dirección. - Al menos 1.4 MW en total. - 1 Punto de carga de 350 kW como mínimo. | Ubicación de carga cada 100 km de la red en cada dirección. - Al menos 1.5 MW en total. - 1 Punto de carga de 350 kW como mínimo. |
| Áreas de estacionamiento de camiones seguros y protegidas | - | Al menos 2 puertos de carga con al menos 100 Kw cada uno. | Al menos 2 puertos de carga con al menos 100 Kw cada uno. |
| Nodos Urbanos | Al menos 0.9 MW con al menos 150 kW por punto de carga | | En cada caso al menos 1.8 MW con al menos 150 kW por punto de carga. |

Fuente: Tomado y adaptado de [Megawatt charging in long-haul trucking: First findings on challenges and solutions](#)²⁷.

La Tabla 7 presenta un resumen consolidado de los requisitos establecidos por AFIR para cada estado miembro en cuanto a número de estaciones de carga y potencia de carga.

²⁷ Plötz, P., Speth, D., Kappler, L., Klausmann, F., Satvat, B. (2024): Megawatt charging in long-haul trucking: First findings on challenges and solutions. Karlsruhe: Fraunhofer ISI.

Tabla 7. Requisitos de AFIR para la infraestructura de carga pública de HDEV por país.

| País | Red (Km) | | Número de estaciones de carga | | | Potencia de carga en MW | | |
|--------------|---------------|---------------|-------------------------------|--------------|--------------|-------------------------|--------------|--------------|
| | Básica | Global | 2025 | 2027 | 2030 | 2025 | 2027 | 2030 |
| Austria | 1,097 | 730 | 6 | 17 | 52 | 10.9 | 62 | 156 |
| Bélgica | 805 | 1,038 | 6 | 18 | 48 | 10.1 | 53 | 129 |
| Bulgaria | 1,508 | 1,340 | 8 | 27 | 78 | 16.4 | 90 | 224 |
| Croacia | 1,153 | 780 | 6 | 18 | 55 | 11.6 | 66 | 164 |
| Chipre | 157 | 336 | 2 | 5 | 13 | 2.7 | 13 | 32 |
| Rep. Checa | 1,015 | 1,134 | 6 | 20 | 57 | 12 | 64 | 157 |
| Dinamarca | 813 | 849 | 5 | 16 | 45 | 9.5 | 51 | 126 |
| Alemania | 6,369 | 5,027 | 32 | 104 | 314 | 65.9 | 369 | 918 |
| Estonia | 375 | 975 | 4 | 14 | 33 | 6.9 | 32 | 77 |
| Finlandia | 1,040 | 4,572 | 17 | 55 | 127 | 26.7 | 113 | 264 |
| Francia | 5,555 | 8,960 | 41 | 137 | 366 | 76.9 | 386 | 940 |
| Grecia | 1,760 | 3,079 | 14 | 46 | 121 | 25.4 | 126 | 305 |
| Hungría | 1,102 | 1,607 | 8 | 26 | 70 | 14.7 | 75 | 183 |
| Irlanda | 504 | 1,715 | 7 | 22 | 52 | 10.9 | 48 | 114 |
| Italia | 4,319 | 6,416 | 31 | 101 | 273 | 57.3 | 292 | 712 |
| Letonia | 719 | 1,012 | 5 | 17 | 45 | 9.5 | 48 | 118 |
| Lituania | 609 | 1,450 | 6 | 20 | 50 | 10.5 | 50 | 119 |
| Luxemburgo | 70 | 20 | 1 | 2 | 4 | 0.8 | 5 | 12 |
| Malta | 16 | 111 | 1 | 2 | 4 | 0.8 | 4 | 8 |
| Países Bajos | 670 | 1,417 | 7 | 21 | 52 | 10.9 | 53 | 126 |
| Polonia | 3,700 | 4,398 | 23 | 75 | 212 | 44.5 | 235 | 578 |
| Portugal | 946 | 2,015 | 9 | 29 | 73 | 15.3 | 74 | 177 |
| Rumanía | 2,575 | 2,268 | 14 | 45 | 132 | 27.7 | 153 | 379 |
| Eslovaquia | 834 | 747 | 5 | 15 | 43 | 9 | 50 | 123 |
| Eslovenia | 446 | 157 | 2 | 6 | 19 | 4 | 24 | 60 |
| España | 5,774 | 6,365 | 34 | 113 | 321 | 67.4 | 360 | 887 |
| Suecia | 3,010 | 3,435 | 18 | 60 | 170 | 35.7 | 190 | 467 |
| EU-27 | 46,941 | 61,953 | 318 | 1,031 | 2,829 | 594 | 3,086 | 7,555 |

Fuente: Tomado y adaptado de Fraunhofer ISI.

Según AFIR, para 2030 se prevé la instalación de aproximadamente 2,800 estaciones de carga con una capacidad total de 7.5 GW a lo largo de los casi 110,000 km de los corredores TEN-T en toda Europa.

Para los objetivos intermedios de 2025 y 2027, el número de estaciones de carga podría ser ligeramente menor, ya que el cálculo de la cuota permite distancias mayores entre estaciones o su ubicación en puntos accesibles desde ambos lados de la vía, conforme al Artículo 4(2) de la AFIR. Además, la potencia total de carga podría ajustarse en zonas de baja densidad de tráfico (Fraunhofer ISI, 2024). La Figura 17 ilustra los puntos de carga para HDEV por país según AFIR en el lado izquierdo, y la potencia prevista de la infraestructura en el lado derecho expresada en megavatios [MW].

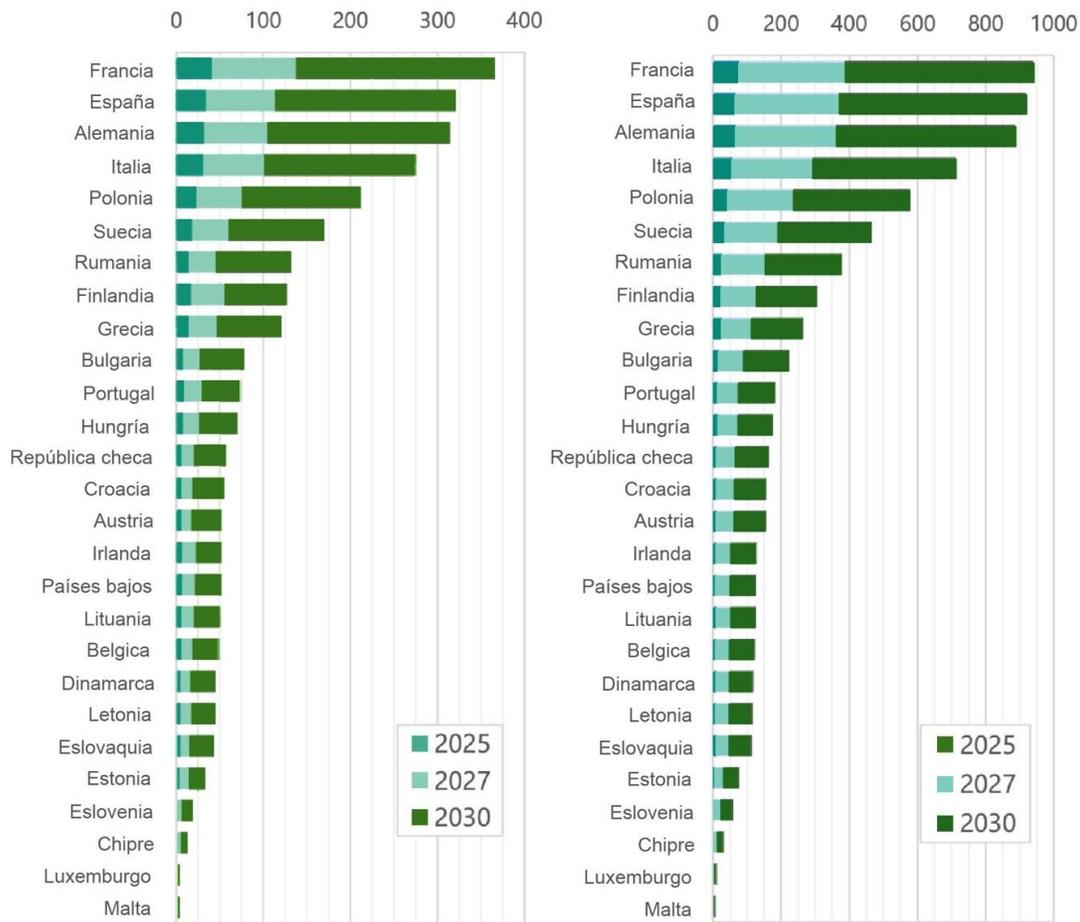


Figura 17. Puntos de carga y potencia [MW] para camiones en carretera. Fuente: Fraunhofer ISI.

Teniendo en cuenta los objetivos que se tienen con horizonte a 2030, en el marco de la Unión Europea se han desarrollado diversos programas, proyectos piloto e iniciativas relacionados con los HDEV, algunos de los más relevantes se resumen a continuación:

4.3.1.1. HoLa (High-Performance Charging for Long-Haul Truck Transport)

Construcción, operación e investigación complementaria para los primeros sistemas de carga de megavatios para camiones en Alemania.

El proyecto es una iniciativa pionera en Alemania que busca establecer y probar una infraestructura de carga de alta potencia para camiones eléctricos de larga distancia. Está coordinado por NOW GmbH y financiado por el Ministerio Federal de Digitalización y Transporte, así como por el Ministerio Federal de Economía y Protección del Clima de Alemania. Su desarrollo se lleva a cabo en estrecha colaboración con operadores logísticos, fabricantes de camiones y proveedores de infraestructura de carga (Fraunhofer, 2024).

Con una financiación de 12 millones de euros, el proyecto se desarrolla dentro del marco de la directriz de financiación para la movilidad eléctrica. La coordinación de los fondos está a cargo de NOW GmbH, mientras que su ejecución es gestionada por Project Management Jülich (PtJ) (NOW GmbH, 2024).

El objetivo principal de HoLa es la implementación de estaciones de carga con el estándar MCS en ocho ubicaciones estratégicas a lo largo de las autopistas alemanas, facilitando así el despliegue de camiones eléctricos de batería en rutas de larga distancia. Para ello, el proyecto se divide en dos fases:

1. En la primera fase, se instalan cargadores de alta potencia con conectores CCS en cuatro ubicaciones piloto.
2. En la segunda fase, se amplía la infraestructura con cargadores MCS en todas las estaciones.

A lo largo de la autopista A2, entre Berlín y la región del Ruhr, se instalarán dos puntos de carga CCS para camiones en cinco ubicaciones, de las cuales tres estarán en la autopista y dos en centros logísticos (ver Figura 18). Esto permitirá la integración temprana de camiones eléctricos en procesos logísticos reales y evaluará el rendimiento del nuevo sistema de carga rápida en condiciones operativas. Al finalizar el proyecto, habrá un total de diez puntos de carga CCS y ocho MCS en cinco ubicaciones, proporcionando una base para la expansión nacional de esta tecnología (Fraunhofer, 2024).



Figura 18. Ubicaciones de los puntos de carga para el proyecto HoLa. Fuente: Fraunhofer.

El consorcio que respalda esta iniciativa incluye a fabricantes de camiones como Daimler Truck y MAN, junto con proveedores de infraestructura como ABB, Allego y Siemens, y empresas logísticas como Contargo y Holcim. Además, varias instituciones de investigación y desarrollo participan en la evaluación de la viabilidad técnica y económica del sistema, asegurando su escalabilidad y compatibilidad con la red eléctrica (Hochleistungs-laden lkw fernverkehr, 2024).

Más allá de su impacto en Alemania, HoLa sienta las bases para la futura expansión del sistema de carga MCS en Europa, contribuyendo significativamente a la descarbonización del transporte de mercancías y al cumplimiento de los objetivos climáticos de la Unión Europea (Hochleistungs-laden lkw fernverkehr, 2024).

4.3.1.2. Iniciativa E-Charge

La iniciativa E-Charge es un proyecto colaborativo que se desarrolla entre diciembre de 2021 y junio de 2025, con el objetivo de impulsar la electrificación del transporte de carga pesada de larga distancia mediante vehículos eléctricos de batería. Liderado por 14 entidades, el proyecto se centra en desarrollar, probar y demostrar soluciones escalables para integrar estos vehículos en corredores logísticos activos en Suecia.

Las pruebas tienen en cuenta los tiempos de conducción y descanso de los conductores, siguiendo un esquema de operación en el que los camiones circulan durante 4.5 horas, descansan durante 45 minutos y luego reanudan su ruta por otras 4.5 horas, cumpliendo con las normativas europeas de conducción y descanso, y simulando condiciones reales de trabajo (Vinnova, 2025).

Uno de los objetivos clave de E-Charge será contribuir al desarrollo de la primera versión del sistema de carga MCS, fundamental para la viabilidad de los camiones eléctricos en rutas de larga distancia. Para ello, se establecerán y operarán estaciones de carga en ubicaciones estratégicas, incluyendo puntos públicos gestionados por *Circle K* y *OKQ8*, así como terminales de carga utilizadas en operaciones logísticas de empresas como DB Schenker, ICA y Tommy Nordbergh (Lindholmen Science Park). Además de las estaciones públicas, se implementarán cargadores en terminales logísticas, permitiendo la carga mientras se realizan operaciones de carga y descarga de mercancía.

El desarrollo tecnológico de la infraestructura de carga es liderado por *Volvo*, *Scania* y *ABB*, quienes están a cargo de diseñar y probar el MCS en escenarios reales. La integración de estos cargadores en la red eléctrica es un aspecto clave del proyecto, asegurando que su implementación no genere problemas de suministro energético.

El proyecto también se enfoca en la investigación²⁸ sobre el consumo energético de los vehículos, la optimización de la infraestructura de carga y su impacto en la red eléctrica, así como en la evaluación de modelos de negocio y riesgos asociados. Para ello, cuenta con la participación de instituciones académicas como Chalmers, la Universidad de Linköping, la Universidad de Lund y la Universidad de Uppsala, además del Swedish Electromobility Center (SEC) y Vattenfall (Lindholmen Science Park). La investigación abarca desde la eficiencia energética de los camiones hasta la escalabilidad del sistema y las políticas necesarias para su adopción masiva.

Se espera que para finales de 2025, E-Charge haya generado conocimientos clave sobre la implementación de camiones eléctricos en el transporte de larga distancia, sentando las bases para futuras ampliaciones del sistema y contribuyendo a los objetivos de reducción de emisiones de la Unión Europea (Vinnova, 2025). Además, el proyecto está alineado con las iniciativas de

²⁸ Algunas de las pruebas ya concluidas se pueden consultar en <https://www.lindholmen.se/en/news/first-tests-electric-long-haul-transport-underway-within-e-charge>

electrificación de la red TEN-T, facilitando la integración de estos sistemas en los corredores logísticos transnacionales.

4.3.1.3. European Clean Transport Network (ECTN) Alliance

La European Clean Transport Network (ECTN) Alliance es una iniciativa conjunta de CEVA Logistics, ENGIE y SANEF que busca acelerar la descarbonización del transporte de mercancías por carretera de larga distancia en Europa. Su objetivo es desarrollar una red de terminales de relevo estratégicamente ubicados en las autopistas europeas, equipados con cargadores eléctricos de alta potencia y surtidores de biogás e hidrógeno verde.

En noviembre de 2023, la alianza lanzó una prueba de concepto en Francia, cubriendo más de 900 kilómetros entre Avignon y Lille, para evaluar la viabilidad del transporte de carga de bajas emisiones en condiciones reales (Ceva Logistics, 2024). Este concepto se basa en una red de estaciones de relevo donde los remolques son intercambiados y los camiones pueden recargar con alternativas al diésel, sin necesidad de desarrollar nuevas tecnologías, sino aprovechando infraestructuras ya existentes (BY Innovation, 2023).

El trayecto entre Avignon y Lille se ha dividido en cuatro segmentos: Avignon-Lyon, Lyon-Dijon, Dijon-Sommesous y Sommesous-Lille (ver Figura 19), permitiendo que cada camión complete dos viajes de ida y vuelta al día entre dos de estas estaciones de relevo (BY Innovation, 2023).

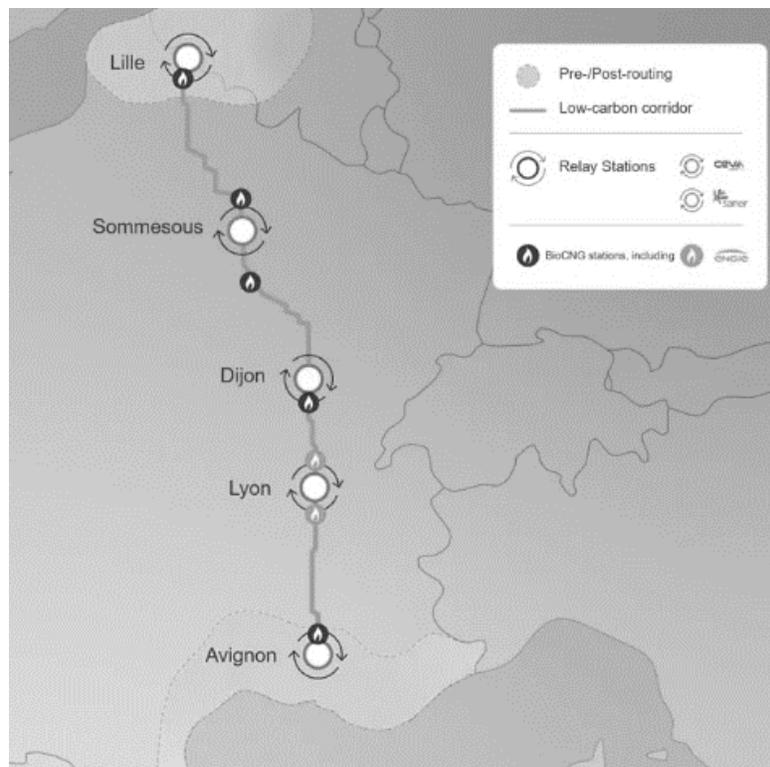


Figura 19. Estaciones de relevo en el corredor Avignon-Lille. Fuente: Ceva Logistics.

Además de la infraestructura física, la alianza busca desarrollar una solución informática que permita planificar rutas y gestionar los horarios de carga dentro de esta red, fomentando un enfoque abierto y cooperativo para la transición (Ceva Logistics, 2024). Los operadores logísticos podrán gestionar en tiempo real los tiempos de tránsito, consumo de energía y emisiones, lo que busca garantizar transparencia en la operación (BY Innovation, 2023).

Otro de los objetivos del proyecto es mejorar las condiciones laborales de los conductores de camiones de larga distancia. Al implementar el sistema de intercambio de remolques en terminales, los conductores podrán operar en segmentos más cortos, reduciendo la distancia entre su lugar de trabajo y su hogar, lo que haría más atractiva la profesión y contribuiría a mitigar la crisis de escasez de conductores en Europa (Sanef, 2023).

Cada miembro de la ECTN Alliance contribuye con su experiencia en la implementación del piloto:

- CEVA Logistics ha establecido estaciones de relevo en Avignon, Lyon, Dijon y Lille, además de una torre de control en Valenciennes para supervisar el flujo de mercancías, los tiempos de tránsito y el consumo energético.
- ENGIE es responsable de instalar y operar las estaciones de carga eléctrica y los surtidores de biogás.
- SANEF alberga una estación de relevo en el área de servicio de Sommesous.

El programa inició con cuatro camiones a biogás operados por F.D.E. Transports y su objetivo inicial era expandirse progresivamente hasta alcanzar 16 camiones, de los cuales 12 serían eléctricos. La meta principal buscaba hacer que los 16 semirremolques recorrieran la red cinco días a la semana, con ocho unidades desplazándose hacia el norte desde la zona comercial de Marsella-Avignon y las otras ocho hacia el sur desde Lille. (BY Innovation, 2023).

Además, el modelo de red de relevo de la ECTN despertó el interés de empresas como Intermarché Food Logistics y Heineken, que han confiado parte de sus envíos al sistema como parte de la prueba piloto (BY Innovation, 2023).

Para evaluar el potencial de escalabilidad del proyecto, se ha lanzado un estudio de viabilidad a cargo de CEVA Logistics (como encargado de la parte logística), SANEF (como encargado de la gestión de autopistas) y ENGIE (con enfoque en movilidad de bajas emisiones), junto con consultores especializados de ENGIE Impact y Carbone 4. Este estudio modelará cómo podría implementarse la red de manera generalizada en Europa y planea estimar su impacto en la reducción de emisiones del transporte de larga distancia (BY Innovation, 2023).

4.3.2. El caso de los Países Bajos

Los Países Bajos ha adoptado una estrategia integral y coordinada para liderar la transición hacia la movilidad eléctrica, con el objetivo de cumplir con los compromisos del Acuerdo Climático de 2019 y del paquete *Fit for 55*²⁹ de la Unión Europea. Con una de las redes de carga más densas del mundo y una cuota de mercado de vehículos eléctricos en constante crecimiento, el país ha desarrollado la *Dutch National Charging Infrastructure Agenda* (NAL), un plan de acción multisectorial que busca garantizar una infraestructura de carga accesible, inteligente y segura (NAL, 2022).

Uno de los pilares clave de esta transición es la adopción de **protocolos y mercados abiertos** para la interoperabilidad de los puntos de carga. Esto permite que cualquier conductor de vehículo eléctrico pueda cargar en distintas estaciones con una sola tarjeta y beneficiarse de tarifas competitivas (NAL, 2022). Además, se han implementado estándares para facilitar el monitoreo de sesiones de carga y la integración de datos a nivel nacional y europeo.

Su enfoque también prioriza la seguridad cibernética y la carga inteligente (*smart charging*), lo que permite gestionar la demanda eléctrica de manera eficiente y aprovechar fuentes de energía renovables. Para lograrlo, se ha establecido una estrecha colaboración entre el gobierno, operadores

²⁹ Propuestas legislativas de la UE para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, con el objetivo de lograr una reducción del 55% para 2030 en comparación con 1990.

de red, municipios, empresas y centros de investigación, asegurando un desarrollo sostenible y a gran escala de la infraestructura de carga para todo tipo de vehículos eléctricos, desde automóviles hasta HDEV y transporte público (NAL, 2022). Algunos de los pilotos de carga inteligente que se han realizado o están aún en desarrollo se encuentran compilados en la Tabla 8.

Tabla 8. Pilotos e iniciativas para carga inteligente en los Países Bajos

| Proyecto | Objetivo | Ubicación | Alcance | Innovación/Resultados |
|---|---|---|---|--|
| FLEET (2020-2024) | Integrar la carga inteligente con tarifas flexibles para optimizar la infraestructura eléctrica. | Utrecht | 380 estaciones de carga en 200 redes de baja tensión. | Gestión eficiente que reduce picos de demanda y optimiza la red. |
| ROBUST (2021-2025) | Desarrollar un sistema replicable para mitigar la congestión urbana con carga bidireccional (V2G ³⁰). | Utrecht | 700 estaciones de carga V2G. | Enfoque en interoperabilidad y aceptación del usuario. |
| SCALE (2022-2025) | Establecer un marco europeo para la carga inteligente y bidireccional a gran escala. | Utrecht | 500 estaciones de carga V2G. | Estándares para la integración de V2G en entornos urbanos. |
| VAP-DC (2020-2023) | Desarrollar una plaza de carga autónoma con corriente continua y energía solar. | Plaza ASR | 250 estaciones de carga V2G. | Uso de "Droop Rate Control" para gestión autónoma de la energía. |
| SmoothEMS con Gridshield (2021-2024) | Optimizar la carga considerando necesidades individuales y proteger contra fallos de la red. | Utrecht, Zwolle, Universidad de Twente | 250 estaciones de carga para (Utrecht), 4 (Zwolle), 5 (Twente). | Combina gestión predictiva (SmoothEMS) con seguridad reactiva. |
| MRA-E Carga Ecológica (2021-2024) | Ajustar la carga a picos de energía renovable para aliviar la red. | Holanda Septentrional, Flevoland, Utrecht | 3.500 estaciones de carga para 2024. | Optimización dinámica según la disponibilidad de energía verde. |
| Carga Flexible EQUANS (2023) | Evaluar el impacto de la carga flexible en la gestión de capacidad de la red. | Holanda Meridional | 334 puntos de carga en 50 vecindarios. | Ajuste remoto de velocidad de carga en horas punta. |
| Plaza de Carga Inteligente (2020-2023) | Evaluar la expansión rápida de la infraestructura de carga inteligente. | 19 municipios (Utrecht, Ámsterdam, Maastricht, otros) | 500 puntos de carga inteligentes. | Identificación de 17 "lecciones de oro" para implementación. |
| Flexpower 3 (2021-2022) | Hacer la demanda de carga de vehículos eléctricos gestionable por el operador de la red. | Ámsterdam | 10 áreas con 6 estaciones de carga o más. | Distribución eficiente de energía según la demanda simultánea. |
| Re-ESCAPE (2020-2022) | Optimizar la carga según la oferta de energía sostenible y los precios del mercado. | Holanda Septentrional, Flevoland, Utrecht | 1.000 estaciones de carga. | Ajuste dinámico con precios de mercado EPEX. |
| V2GHub | Monitorear y documentar avances internacionales en tecnologías V2G. | Plataforma digital | Datos globales de proyectos piloto V2G. | Visor interactivo con información detallada. |

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos publicados en NAL³¹.

Una parte fundamental de esta transición es el respaldo financiero que impulsa la adopción de tecnologías limpias en el sector del transporte. En este sentido, el gobierno de los Países Bajos ha

³⁰ V2G es la abreviación para Vehicle to grid

³¹ Nationale Agenda Laadinfrastructuur (NAL).

implementado programas como la subvención para la compra de camiones de cero emisiones (AanZET, por sus siglas en holandés), que incentiva a las empresas y al sector transporte a incorporar vehículos pesados libres de emisiones en sus flotas. Este programa ofrece subvenciones de hasta 115,200 euros por vehículo (ver Tabla 9), facilitando la adquisición o el arrendamiento financiero de camiones eléctricos. Para 2025, se ha destinado un presupuesto adicional de 30 millones de euros, con una nueva fase de solicitudes prevista para el 30 de septiembre de 2025 (RVO, 2025).

Tabla 9. Monto máximo del subsidio AanZET y porcentaje por categoría de vehículo y tipo de empresa en 2025

| Categoría de vehículo | Gran empresa | | Empresa mediana | | Pequeña empresa + organización sin fines de lucro | |
|---|------------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|---|-----------------------|
| | Porcentaje de subsidio | Monto máximo subsidio | Porcentaje de subsidio | Monto máximo subsidio | Porcentaje de subsidio | Monto máximo subsidio |
| Chasis de camión N2 a partir de 10.000 kg | 6.1% | € 15,200 | 12% | € 29,900 | 14.8% | € 36,900 |
| Chasis de camión N3 | 11.1% | € 43,900 | 21% | € 83,200 | 29% | € 115,200 |
| Tractor N3 | 11.1% | € 43,900 | 21% | € 83,200 | 29% | € 115,200 |

Fuente: Elaborado a partir de información publicada en Rijkdienst voor ondernemend nederland (RVO)³².

En línea con la NAL, se desarrollaron las primeras estaciones de carga pública para camiones eléctricos, cuya ubicación está disponible en línea a través de herramientas de localización. Una iniciativa destacada en este ámbito es el servicio de datos proporcionado por Eco-movement, en colaboración con Rijkswaterstaat y la RVO. Este servicio realiza un inventario actualizado de las estaciones de carga y lo pone a disposición en plataformas para la localización de los “*Clean Energy Hubs*”, permitiendo el monitoreo continuo del desarrollo de la infraestructura de carga logística. Además, Rijkswaterstaat utiliza estos datos para informar a las autoridades y al sector empresarial sobre los avances en la implementación de puntos de carga para vehículos pesados. Se prevé que, a futuro, esta información se integre en las principales herramientas de navegación y planificación, facilitando el acceso y la gestión eficiente de la red de carga (Agenda Laadinfra, 2023).

El modelo de transición hacia la movilidad eléctrica en los Países Bajos se ha consolidado como un referente en Europa, destacando la importancia de la planificación estratégica, la innovación tecnológica y la colaboración público-privada para avanzar hacia un sistema de transporte más sostenible y eficiente (NAL, 2022).

4.3.3. Normativa y/o leyes clave

Dentro de la UE-27, el Reglamento (UE) 2023/1804 ha sido la normativa con mayor impacto en el despliegue de infraestructura de carga para HDEV. Sin embargo, antes de su aprobación, diversas normativas fueron establecidas para impulsar el desarrollo de la infraestructura de carga de EVs, sentando las bases para alcanzar el nivel de implementación actual. Entre las principales leyes y resoluciones que han marcado este proceso se encuentran:

³² Agencia empresarial de los Países Bajos.

Directiva 2014/94/UE: Adoptada el 22 de octubre de 2014 con última versión consolidada el 12 de noviembre de 2021. Esta directiva estableció un marco común para la implantación de infraestructuras de combustibles alternativos, incluyendo la recarga de vehículos eléctricos. Su propósito fue garantizar la disponibilidad y accesibilidad de estas infraestructuras en toda la Unión Europea, fomentando así la adopción de tecnologías más limpias en el transporte. Asimismo, introdujo requisitos para que los Estados Miembros desarrollaran planes nacionales de política que promoviera la instalación de puntos de recarga y aseguraran la interoperabilidad de los sistemas (Comisión Europea, 2021).

Propuesta del Parlamento Europeo de 2022: Como parte del paquete legislativo "Objetivo 55 en 2030", el Parlamento Europeo propuso que, para 2026, se establecieran estaciones de carga para vehículos eléctricos cada 60 km en las principales carreteras de la UE. Esta iniciativa responde a la necesidad de crear una red de recarga homogénea y accesible que permita a los usuarios de vehículos eléctricos desplazarse sin limitaciones por todo el territorio europeo. El paquete "Objetivo 55" tiene como meta reducir las emisiones netas de gases de efecto invernadero en al menos un 55% para 2030, en comparación con los niveles de 1990, facilitando así la transición hacia una economía baja en carbono (Parlamento Europeo, 2022). Estos lineamientos fueron los que se incluyeron más tarde dentro de AFIR en el reglamento (UE) 2023/1804.

Reglamento (UE) 2023/1542: Aprobado el 12 de julio de 2023, este reglamento regula la gestión de pilas, baterías y sus residuos en la Unión Europea. Aunque su enfoque principal es la sostenibilidad en la fabricación y reciclaje de baterías, también tiene un impacto directo en la infraestructura de carga para vehículos eléctricos, ya que busca garantizar un suministro responsable y seguro de estos componentes. Las disposiciones del reglamento establecen criterios estrictos para la producción de baterías, promoviendo la economía circular y asegurando que los materiales críticos utilizados en la electromovilidad sean reciclados y reutilizados en la mayor medida posible (TÜV Rheinland, s.f.).

5. Interoperabilidad y estandarización

Durante el desarrollo de este informe se ha hablado de los conceptos de estandarización e interoperabilidad como aspectos clave para el despliegue de la infraestructura de carga. Por ello, es importante entender qué es y por qué es tan relevante en este contexto.

Si bien no hay una definición única sobre interoperabilidad, en su definición más simple es “la capacidad de los sistemas (tanto hardware como software) y los procesos de negocio subyacentes para intercambiar datos y compartir información y conocimientos” (Move Latam, 2023). Esta no solo implica la compatibilidad técnica entre diferentes sistemas, sino que también abarca la capacidad de los actores del ecosistema (fabricantes, operadores de infraestructura, proveedores de servicios de movilidad y autoridades regulatorias) para colaborar bajo estándares comunes.

5.1. Beneficios de la interoperabilidad

Según el informe de MOVE Latam, la interoperabilidad ofrece múltiples beneficios a los actores del ecosistema de carga eléctrica para el despliegue e implementación de sus sistemas. Algunos de los beneficios son:

- **Acceso universal a la infraestructura de carga:** Los usuarios pueden cargar sus vehículos en cualquier estación de carga pública, independientemente del operador o del proveedor de servicios, lo que facilita el uso de la red de carga a gran escala.
- **Reducción de costos de instalación e integración:** Al eliminar la necesidad de servicios o componentes de conversión, la interoperabilidad disminuye los costos asociados con la implementación y mantenimiento de la infraestructura de carga.
- **Escalabilidad eficiente de los servicios:** Permite la expansión y el desarrollo de nuevas estaciones de carga mediante la reutilización de componentes y protocolos interoperables, optimizando los recursos existentes.
- **Desarrollo ágil de nuevos servicios:** Al estandarizar la comunicación entre sistemas, se facilita la creación de nuevas soluciones y servicios sin depender de tecnologías propietarias o exclusivas.
- **Facilitación del roaming de carga:** Los usuarios pueden acceder a estaciones de carga en diferentes regiones sin necesidad de registrarse en múltiples plataformas, lo que mejora la experiencia del usuario y fomenta la movilidad transfronteriza.
- **Mayor competencia y transparencia:** La interoperabilidad impide el bloqueo tecnológico (lock-in), lo que fomenta un entorno de mercado abierto en el que los operadores deben ofrecer precios claros, competitivos y condiciones justas para los usuarios.
- **Optimización de la infraestructura y la gestión de la demanda:** Facilita la integración de tecnologías como el *Smart Charging*, mejorando la eficiencia en el uso de la red eléctrica y permitiendo una gestión equilibrada de la demanda energética.

Jone Orbea, líder de Movilidad Eléctrica en América latina y el Caribe del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), aclara que “La interoperabilidad no es solamente tener un enchufe que encaje, es también intercambio de información, de datos entre el vehículo y el cargador, de pagos del servicio, etcétera”. Por lo tanto, los conceptos de apertura y roaming pasan a ser claves en la interpretación de su definición.

La apertura se refiere a la disponibilidad de estándares y protocolos abiertos que permiten la interoperabilidad sin restricciones por parte de un proveedor específico (Move Latam, 2023).

El roaming, en el contexto de la movilidad eléctrica, se refiere a la capacidad de cargar un vehículo eléctrico en distintas estaciones de recarga utilizando una misma tarjeta o aplicación,

independientemente del operador de punto de carga (*CPO*, por sus siglas en inglés) o proveedor de servicios de movilidad (*MSP*, por sus siglas en inglés) (Virta, 2025).

En este orden de ideas, el roaming de vehículos eléctricos se refiere a la posibilidad de que un usuario, con una suscripción a un operador o proveedor de servicios (A), pueda cargar su vehículo en una estación gestionada por otro operador (B), sin necesidad de tener un contrato directo con este último. No obstante, para que el roaming funcione, ambos operadores deben establecer un acuerdo de colaboración que permita a los usuarios acceder a la infraestructura de carga de cualquiera de las partes de manera fluida, utilizando una única suscripción (Move Latam, 2023). A continuación, se detallan los requisitos básicos para implementar el roaming de vehículos eléctricos:

- Un acuerdo contractual entre las partes involucradas. Dicho acuerdo puede ser directo (bilateral) o indirecto (a través de una plataforma de roaming o agregadores similares).
- Una conexión a internet en el punto de recarga que permita la autenticación directa y el intercambio de información de recarga.
- Cualquier función de autenticación y activación remota, como un lector de tarjetas de identificación por radiofrecuencia (en inglés, *Radio Frequency Identification - RFID*), un token o cualquier otra similar.
- Hardware, sistemas de software y protocolos de comunicación interoperables, como el OCPP, para facilitar la autenticación mencionada anteriormente y las funcionalidades de activación.

Adicional a estos requisitos, se requieren diversos elementos a lo largo de la cadena de valor. Estos elementos están estrechamente vinculados a las diferentes capas de interoperabilidad, las cuales se resumen en la Tabla 10.

Tabla 10. Capas de interoperabilidad

| Capa | Descripción |
|---------------------|--|
| Hardware | Hardware del sistema. Compatibilidad física de enchufes, conectores y estaciones de carga (CCS, CHAdeMO, MCS, etc.). |
| Comunicación | Conexiones entre sistemas de hardware y software, vía ethernet, inalámbrica o vía cable de recarga. Protocolos abiertos que permiten la interacción entre estaciones y sistemas de gestión (OCPP, OCPI). |
| Información | Modelos de datos que permiten intercambiar información (tarifas, estado de carga, autenticación). |
| Servicio | Procesos comerciales relacionados con la gestión de usuarios, facturación y acceso (roaming). |
| Negocio | Marco regulatorio y comercial que define las condiciones de operación y la relación entre actores. |

Fuente: Elaborado a partir del informe de (Move Latam, 2023).

5.2. Actores involucrados en la interoperabilidad

Para comprender el funcionamiento de la interoperabilidad en la infraestructura de carga, es fundamental identificar y definir los roles de los principales actores involucrados en la prestación del servicio. Diversas fuentes bibliográficas coinciden en que estos actores cumplen funciones específicas y deben estar interconectados para garantizar un ecosistema de carga eficiente y accesible (Ministerio de Energía de Chile, s.f.). En este contexto, se pueden distinguir siete tipos de

actores clave, organizados según su función en la cadena de valor de los sistemas de carga (Ver Figura 20).

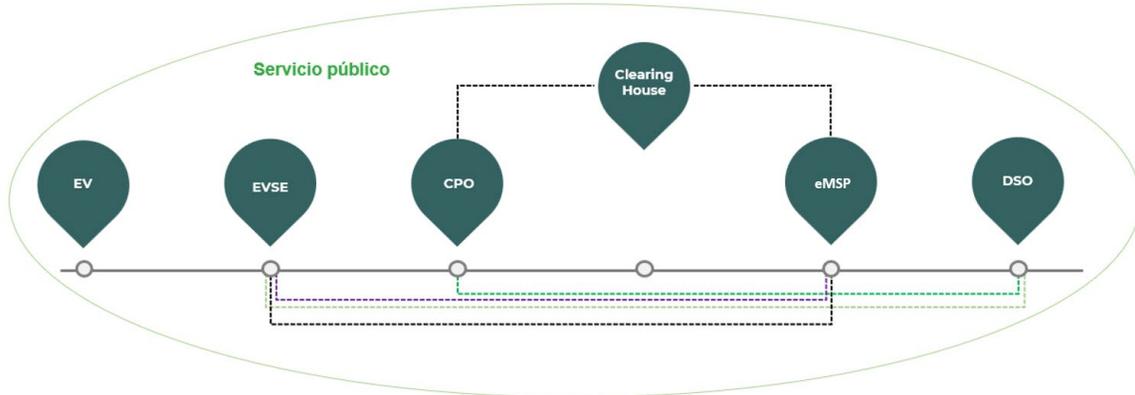


Figura 20. Actores clave involucrados en la interoperabilidad. Fuente: Adaptación a partir de información del ministerio de energía de Chile.

1. El Servicio Público (Gobierno y Reguladores)

El Servicio Público desempeña un papel fundamental al establecer el marco normativo de interoperabilidad. A través de regulaciones específicas, define las condiciones que permiten la integración y comunicación entre los distintos actores del ecosistema. Cualquier actor que desee incorporarse a la cadena de valor de la carga de vehículos eléctricos debe cumplir con estos requisitos para garantizar la interoperabilidad y facilitar la conexión con el resto del sistema (Ministerio de Energía de Chile, s.f.).

2. El Usuario de Vehículo Eléctrico (EV)

El EV representa a todos los usuarios que acceden al sistema de carga pública. Este grupo incluye desde conductores de vehículos particulares hasta operadores de flotas comerciales o municipales. La interoperabilidad es esencial para garantizar que cualquier usuario pueda acceder a cualquier punto de carga, independientemente del proveedor del servicio.

3. Proveedores de Equipamiento de Carga (EVSE)

El EVSE (*Electric Vehicle Supply Equipment*) se refiere a los actores responsables de proporcionar la infraestructura física de carga. Este grupo incluye a los fabricantes e instaladores de estaciones de carga para vehículos eléctricos, tanto de corriente continua como de corriente alterna. La interoperabilidad en este nivel asegura que los diferentes modelos de vehículos puedan conectarse a las estaciones de carga, independientemente del fabricante o del tipo de equipo utilizado.

4. Operadores de Puntos de Carga (CPO)

El CPO (*Charge Point Operator*) es el encargado de gestionar y mantener la operación de las estaciones de carga (EVSE). Este actor asegura el funcionamiento continuo de la red, incluyendo la instalación, el diagnóstico, el mantenimiento y la configuración de precios. Además, los CPO tienen la responsabilidad de conectar la infraestructura de carga con los proveedores de servicios de electromovilidad (eMSP), facilitando el acceso a los usuarios (Ministerio de Energía de Chile, s.f.). Las principales funciones del CPO se dividen en dos áreas:

- **Técnicas:** Instalación, operación, mantenimiento y supervisión de las estaciones de carga.

- **Administrativas:** Gestión del acceso para los proveedores de servicios de movilidad eléctrica (eMSP) y configuración de la conectividad con otras redes.

5. Proveedores de Servicios de Movilidad Eléctrica (eMSP)

El eMSP (*Electric Mobility Service Provider*) es el actor que ofrece servicios de carga a los usuarios finales (EV), generalmente a través de plataformas digitales o aplicaciones. Básicamente es quien conecta a los usuarios con la infraestructura de carga, asegurando una experiencia fluida y accesible, independientemente del operador o la región. Estas herramientas permiten a los usuarios localizar estaciones de carga, iniciar sesiones de carga, elegir métodos de pago y gestionar su consumo.

La interoperabilidad en este nivel es crucial para evitar situaciones donde un usuario no pueda acceder a un punto de carga por no estar registrado en la plataforma de un eMSP específico. Para facilitar el acceso, los eMSP proporcionan tarjetas RFID (identificación por radiofrecuencia) o aplicaciones móviles que permiten autenticar al usuario y gestionar las transacciones de carga (Ministerio de Energía de Chile, s.f.).

6. Operadores del Sistema de Distribución Eléctrica (DSO)

Los DSO (*Distribution System Operator*) son los responsables de gestionar y operar las redes de distribución eléctrica que alimentan las estaciones de carga (EVSE). Su función principal es asegurar el suministro eléctrico continuo y eficiente, adaptando la capacidad de la red a la creciente demanda generada por la infraestructura de carga de vehículos eléctricos.

Los DSO varían según la ubicación geográfica, y su coordinación con otros actores es esencial para optimizar el flujo de energía y garantizar la estabilidad de la red. La interoperabilidad en este nivel permite integrar la infraestructura de carga de manera eficiente en las redes existentes, facilitando la gestión de la demanda y la implementación de tecnologías como la carga inteligente (*smart charging*) y la bidireccionalidad (V2G).

7. Plataformas de Compensación (*Clearing House*)

Las *Clearing House* son entidades que facilitan la gestión y el procesamiento de las transacciones financieras relacionadas con la carga de vehículos eléctricos. Su función principal es registrar y centralizar las sesiones de carga realizadas en una zona, región o país, asegurando que los ingresos generados se distribuyan de manera adecuada entre los diferentes eMSP y CPO involucrados (Ministerio de Energía de Chile, s.f.).

Gracias a la interoperabilidad, las *Clearing House* permiten que los usuarios accedan a estaciones de diferentes operadores con una única suscripción, simplificando la experiencia de carga. Este sistema también garantiza la transparencia en las transacciones y facilita la liquidación de pagos entre los actores del ecosistema de carga pública.

5.3. Las cuatro interacciones de una red de carga interoperable

Como se ha mencionado previamente, el ecosistema de carga pública está compuesto por diversos actores que deben interactuar entre sí para garantizar el correcto funcionamiento de la red y asegurar su interoperabilidad. En este contexto, se identifican cuatro interacciones clave que son fundamentales para el desarrollo de la interoperabilidad en la electromovilidad.

Primera interacción: Conexión entre redes de carga (red-red)

Actualmente, los proveedores de servicios de movilidad eléctrica (eMSP) suelen operar de manera independiente, sin comunicación o integración con otras redes de carga, lo que limita el acceso de

los usuarios a la infraestructura de carga. En un sistema interoperable, cualquier vehículo eléctrico (EV) puede utilizar cualquier estación de carga, independientemente del proveedor del servicio, gracias a una plataforma común que conecta las distintas sub-redes y permite el acceso mediante una única suscripción. Esta interacción no solo facilita el acceso a los usuarios, sino que también mejora la utilización de la infraestructura de carga, beneficiando tanto a los eMSP como a los operadores del sistema de distribución (DSO) al aumentar la demanda y optimizar el uso de los recursos (Ministerio de energía de Chile, s.f.).

Segunda interacción: Comunicación entre estaciones de carga y redes de carga (cargador-red)

Las estaciones de carga (EVSE) deben estar equipadas con protocolos de comunicación que les permitan interactuar de manera eficiente con los CPOs. En una red interoperable, estos protocolos deben ser abiertos y estandarizados, lo que proporciona mayor flexibilidad para integrar diferentes modelos de estaciones de carga, ya sean de corriente continua (DC) o corriente alterna (AC). Esta estandarización fomenta la competencia en la oferta de cargadores y facilita la integración con otros actores del ecosistema, como las plataformas de compensación (Clearing House) encargadas de procesar las transacciones, o los eMSP, que pueden monitorear y ajustar la operación de las estaciones en tiempo real (Ministerio de energía de Chile, s.f.).

Tercera interacción: Compatibilidad física de los conectores

La interoperabilidad también implica la compatibilidad física entre los vehículos eléctricos y las estaciones de carga. La falta de estándares públicos unificados para conectores de corriente continua y corriente alterna aumenta la complejidad operativa y los costos de infraestructura, ya que los operadores deben invertir en múltiples formatos para atender diferentes tipos de vehículos. Para los usuarios, esta fragmentación puede generar dificultades al encontrar un punto de carga compatible con su vehículo. Por su parte, los CPO deben elegir cuidadosamente los estándares que adoptan, ya que la incorporación de múltiples formatos incrementa los costos y la gestión técnica (Ministerio de energía de Chile, s.f.). Además, la existencia de protocolos no interoperables podría limitar la eficacia de las inversiones en infraestructura por parte de las empresas de distribución eléctrica (DSO), dificultando una gestión eficiente de la red.

Cuarta interacción: Relación entre el vehículo eléctrico y la red de carga

En los sistemas actuales, la transferencia de energía entre el vehículo eléctrico y la red de carga es unidireccional (V1G), es decir, la electricidad fluye desde la red, gestionada por el DSO, hacia el vehículo para cargarlo. Sin embargo, en una red interoperable, se busca implementar sistemas bidireccionales (V2G, Vehicle-to-Grid), que permiten no solo cargar el vehículo, sino también devolver energía a la red cuando sea necesario. Este enfoque facilita la implementación de carga inteligente, optimizando el uso de la infraestructura eléctrica en función de la demanda, los niveles de carga del vehículo, los horarios y los incentivos tarifarios (Ministerio de energía de Chile, s.f.). Un sistema de este tipo ofrece beneficios tanto para los propietarios de vehículos eléctricos, que pueden recibir compensaciones por devolver energía a la red, como para los proveedores de servicios de movilidad eléctrica (eMSP), al permitir una gestión más flexible y eficiente de la demanda energética.

Debe tenerse en cuenta que a veces, los operadores de carga (CPO), los propietarios de los puntos de carga (EVSE) y los proveedores de servicios de electromovilidad (eMSP) pueden ser la misma entidad. Los CPO pueden operar su propia infraestructura (EVSE), mientras que los eMSP suelen ofrecer servicios a los propietarios u operadores para atender al usuario final, aunque en algunos casos el CPO y el eMSP coinciden en una sola empresa.

5.4. Estándares y protocolos técnicos

Como se mencionó anteriormente, en un mercado abierto con múltiples conexiones entre actores, los protocolos deben ser interoperables y de acceso abierto. Dado que los modelos de mercado

siguen en evolución, es fundamental que estos protocolos no dependan de una configuración de mercado específica (Move Latam, 2023).

En este contexto, aunque existen varios protocolos interoperables en el mercado para facilitar el roaming, con distintos grados de apertura, hay dos que son fundamentales y se analizarán en este caso para su posible aplicación al segmento de los HDEV.

Open Charge Point Protocol (OCPP)

El OCPP es un protocolo de comunicación estandarizado que permite la interacción entre las estaciones de carga de VE y los sistemas de gestión central de los CPOs. Desarrollado por la Open Charge Alliance, su objetivo es garantizar la interoperabilidad entre diferentes fabricantes y proveedores de servicios, facilitando una integración más flexible y eficiente de la infraestructura de carga (ChargeLab, 2023).

Ventajas del OCPP

- **Interoperabilidad:** Permite que estaciones de carga de distintos fabricantes se integren en una misma red, evitando dependencias de proveedores específicos.
- **Flexibilidad:** Facilita a los operadores la elección y combinación de hardware y software de diferentes proveedores, adaptándose a sus necesidades específicas.
- **Gestión remota:** Ofrece capacidades para monitorear, diagnosticar y actualizar estaciones de carga de forma remota, optimizando la operación y el mantenimiento.

Open Charge Point Interface (OCPI)

La OCPI es una interfaz diseñada para facilitar la comunicación y la interoperabilidad entre CPOs y proveedores de servicios de movilidad eléctrica (eMSP). Este protocolo permite el intercambio de información en tiempo real sobre la disponibilidad de estaciones, tarifas, autenticación de usuarios y procesos de facturación, lo que facilita el roaming y la gestión de transacciones entre diferentes redes. Con OCPI, los usuarios pueden acceder a múltiples estaciones de carga, independientemente del operador, mejorando así la experiencia al hacerla más integrada, accesible y transparente (ChargeLab, 2023).

Ventajas de OCPI

- **Roaming entre redes:** Facilita que los usuarios de vehículos eléctricos puedan acceder a estaciones de carga de distintas redes sin necesidad de múltiples registros o contratos, ampliando las opciones de carga disponibles.
- **Transparencia:** Proporciona información en tiempo real sobre precios y disponibilidad de estaciones, permitiendo a los usuarios tomar decisiones informadas.
- **Simplificación de pagos:** Establece procesos de facturación estandarizados entre diferentes operadores y proveedores de servicios, simplificando las transacciones para los usuarios.

Aunque ambos protocolos buscan mejorar la interoperabilidad en la infraestructura de carga de vehículos eléctricos, se enfocan en diferentes aspectos del ecosistema (ver Tabla 11).

Tabla 11. Diferencias principales entre OCPP y OCPI.

| Característica | OCPP | OCPI |
|---------------------------------------|--|---|
| Enfoque principal | Comunicación entre estaciones de carga y sistemas de gestión central de los operadores. | Interoperabilidad y comunicación entre diferentes redes de carga y proveedores de servicios de movilidad. |
| Usuarios clave | Operadores de puntos de carga (CPO) y fabricantes de estaciones de carga. | Proveedores de servicios de movilidad eléctrica (eMSP) y operadores de puntos de carga (CPO). |
| Funcionalidades | Gestión y control de estaciones de carga, incluyendo monitoreo, diagnóstico y actualizaciones remotas. | Intercambio de información en tiempo real sobre disponibilidad, tarifas, autenticación de usuarios y procesos de facturación entre redes. |
| Beneficios para usuarios de VE | Indirectos, al mejorar la eficiencia y confiabilidad de las estaciones de carga. | Directos, al facilitar el acceso a múltiples redes de carga y proporcionar información transparente sobre opciones de carga. |
| Interoperabilidad | Garantiza que estaciones de carga de diferentes fabricantes puedan integrarse en una misma red. | Permite que los usuarios accedan a servicios de carga en distintas redes sin necesidad de múltiples contratos o registros. |

Fuente: Elaboración propia.

En este orden de ideas, el OCPP estandariza la comunicación entre las estaciones de carga y los sistemas de gestión de los operadores, mientras que el OCPI facilita la interoperabilidad entre redes de carga y proveedores de servicios, permitiendo un acceso más amplio y transparente para los usuarios. Estos dos protocolos son extrapolables para su aplicación en el segmento de los HDEV.

5.5. Interoperabilidad en los casos de estudio

En los casos de estudio analizados hasta el momento, la interoperabilidad desempeña un papel fundamental en el despliegue de la infraestructura de carga. Tanto en Estados Unidos como en la UE-27, este aspecto ha sido abordado, estableciendo lineamientos y requisitos mínimos para su desarrollo.

Interoperabilidad en el contexto de Estados Unidos

En cumplimiento de lo dispuesto por la BIL, la FHWA publicó el 28 de febrero de 2023 la regla final titulada “Normas y requisitos de la infraestructura nacional para vehículos eléctricos”. Este documento establece estándares mínimos para la instalación, operación y mantenimiento de las estaciones de carga, abordando así las disparidades existentes en aspectos clave como los métodos de pago, la visualización de precios, la velocidad y potencia de los cargadores, así como la información sobre la disponibilidad y el estado de las estaciones.

En el marco del NEVI Formula Program, la BIL exige que se desarrollen estándares mínimos en al menos seis áreas, entre ellas, la interoperabilidad de las estaciones de carga. Bajo esta directriz, los requisitos para asegurar la interoperabilidad de las estaciones de carga se dividen en tres niveles principales:

1. Comunicación cargador-vehículo (*Charger-to-EV communication*)

Se exige que los cargadores cumplan con el estándar ISO 15118-3 y cuenten con hardware capaz de implementar ISO 15118-2 y ISO 15118-20. Estos estándares permiten funciones avanzadas como la gestión inteligente de la carga (*smart charge management*) y la tecnología Plug and Charge, que automatiza el proceso de identificación y pago del servicio.

Aunque no todos los vehículos eléctricos implementan actualmente el protocolo ISO 15118, la FHWA lo considera esencial para lograr la estandarización a largo plazo. Por este motivo, desde el 28 de febrero de 2024, el software de los cargadores debe cumplir plenamente con

ISO 15118-2 y estar preparado para futuras actualizaciones. Además, se establece que las pruebas de conformidad para el software y hardware de los cargadores deben seguir las directrices de ISO 15118-4 y ISO 15118-5, respectivamente.

2. Comunicación cargador-red de carga (*Charger-to-Charger-Network Communication*)

Para asegurar la interoperabilidad entre cargadores y las redes que los gestionan, los cargadores deben cumplir con el protocolo OCPP 1.6 o superior, con la obligación de actualizarse a OCPP 2.0.1 a más tardar el 28 de febrero de 2024 (FHWA, 2023). Este protocolo es fundamental para la gestión remota de las estaciones de carga y permite el intercambio de datos en tiempo real entre los cargadores y las plataformas de control.

3. Comunicación entre redes de carga (*Charging-Network-to-Charging-Network Communication*)

Desde el 28 de febrero de 2024, las distintas redes de carga deben ser capaces de comunicarse entre sí utilizando el estándar OCPI 2.2.1 (FHWA, 2023). Este requisito es crucial para que los usuarios accedan a múltiples redes de carga con una experiencia unificada, independientemente del operador.

Un aspecto adicional y significativo de la regulación es la obligación de que los cargadores estén diseñados para permitir el cambio seguro de proveedor de red (*network switching capability*) sin requerir modificaciones de hardware. Este mecanismo fomenta la competencia, facilita la transición entre operadores de infraestructura y protege a los consumidores al evitar la dependencia de un único proveedor. Con estos requisitos, la FHWA busca crear una infraestructura de carga interoperable, abierta a nuevos participantes, que garantice la flexibilidad tecnológica y mejore la experiencia del usuario en todo el país.

Algunos recursos adicionales

Además de esta regulación, ya existían otros recursos que abordan la interoperabilidad en la infraestructura de carga de vehículos eléctricos. En agosto de 2019, el Instituto de Investigación de Potencia Eléctrica (*Electric Power Research Institute, EPRI*) publicó el informe "*Interoperability of Public Electric Vehicle Charging Infrastructure*". Este documento analiza los principales desafíos relacionados con la interoperabilidad en la infraestructura de carga en Estados Unidos.

El informe identifica cuatro áreas clave para abordar la interoperabilidad: la comunicación entre redes de carga, entre estaciones y redes, las interfaces físicas de carga y la interacción entre vehículos y la red eléctrica. Señala también que la ausencia de estándares abiertos y la falta de una comunicación eficiente entre sistemas provoca la fragmentación de las redes (lo que denominan "islas de carga") y generan costos operativos elevados (EPRI, 2019). Además, esta falta de coordinación dificulta la experiencia del usuario debido a la diversidad de métodos de pago y la incompatibilidad entre distintos tipos de conectores.

Como respuesta a estos desafíos, el informe ya promovía la adopción de estándares abiertos como el OCPP y destacaba la necesidad de una colaboración más estrecha entre fabricantes, operadores de red y compañías eléctricas para mejorar la interoperabilidad y ofrecer una experiencia de usuario más fluida.

Interoperabilidad en el contexto de la UE

En la Unión Europea, la interoperabilidad en la infraestructura de carga de vehículos eléctricos es un componente esencial para facilitar la adopción generalizada de la movilidad eléctrica. El Reglamento AFIR establece un marco común para el despliegue de esta infraestructura, con el objetivo de reducir la dependencia del petróleo y mitigar el impacto ambiental del transporte (European Hydrogen Observatory, 2024).

Desde una perspectiva técnica, el Reglamento define estándares específicos para las estaciones de carga en aspectos como la velocidad de carga, los métodos de pago y el acceso del usuario, garantizando la compatibilidad con diversos vehículos eléctricos y facilitando su uso (Unión Europea, 2023). Entre los principales requisitos se encuentran:

- **Métodos de pago universales:** Los conductores de VE deben poder pagar la carga rápida de corriente continua (DC) utilizando tarjetas de pago o dispositivos sin contacto, sin necesidad de suscripción. A más tardar en 2027, todas las estaciones de carga rápida (de 50 kW o más) deben estar equipadas con lectores de tarjetas de pago (Unión Europea, 2023). Los cargadores existentes deberán ser actualizados para cumplir con este requisito.
- **Transparencia en los precios e información en tiempo real:** Los operadores de carga deben proporcionar digitalmente información completa sobre la disponibilidad de los cargadores, tiempos de espera y precios (ya sea por kWh, minuto o sesión) pago (Unión Europea, 2023). Los precios deben ser claros, comparables y transparentes.
- **Acceso a datos abiertos:** Los operadores deben ofrecer datos en tiempo real sobre la disponibilidad, el estado y el uso de los cargadores a través de una Interfaz de Programación de Aplicaciones (*Application Programming Interface*, API por sus siglas en inglés) de acceso abierto, facilitando la integración de servicios y el desarrollo de soluciones digitales (Unión Europea, 2023).
- **Envío de datos a los Puntos de Acceso Nacionales:** Los operadores tienen la obligación de remitir información a los Puntos de Acceso Nacionales (NAPs, por sus siglas en inglés), interfaces digitales establecidas por los Estados miembros para facilitar el intercambio y la reutilización de datos relacionados con el transporte (Kempower, 2024).
- **Accesibilidad mejorada:** Las estaciones de carga deben garantizar un acceso adecuado para las personas con movilidad reducida (Kempower, 2024).
- **Carga Inteligente (*Smart Charging*):** Todos los cargadores nuevos o renovados deben ajustar dinámicamente la electricidad suministrada al vehículo en función de los datos recibidos electrónicamente (Unión Europea, 2023). Esto permite equilibrar la demanda eléctrica, ajustando los tiempos de carga a las horas de menor consumo o reduciendo la velocidad de carga durante los picos de demanda.

Aparte de los estándares definidos por el Reglamento dentro de la UE, Países Bajos ha establecido acuerdos nacionales sobre interoperabilidad, alineados con los estándares europeos. Muchos de los sistemas de carga utilizados en el país son interoperables desde 2011, lo que ha facilitado el desarrollo de la infraestructura. Desde entonces, la cantidad de puntos de carga públicos ha crecido significativamente, alcanzando más de 110,000 unidades a finales de noviembre de 2022 (Nederland Elektrisch.).

6. Tendencias tecnológicas

El despliegue de infraestructura de carga para vehículos eléctricos pesados está apenas comenzando, pero ya existen varias tendencias clave que marcarán su evolución. A medida que la electrificación del transporte de carga avanza, es importante entender cómo los desarrollos en carga de alta potencia, diseño, gestión inteligente de la carga y la integración con la red eléctrica están influyendo en este proceso.

6.1. Infraestructura de carga de alta potencia

La electrificación del transporte de carga avanza con la implementación de estaciones capaces de manejar potencias elevadas, esenciales para vehículos pesados. Un ejemplo destacado es el MCS, un estándar global que permite ofrecer hasta 3.75 MW de potencia por cargador. Esta capacidad es fundamental para reducir los tiempos de carga de camiones de larga distancia. Gracias a esta tecnología, los camiones podrían cargarse en aproximadamente 30 minutos (NREL, 2025), lo que ayuda a mitigar las barreras operativas asociadas con los tiempos de inactividad durante la carga.

A medida que aumenta el número de camiones eléctricos pesados en circulación, la infraestructura de carga debe adaptarse para satisfacer demandas energéticas aún mayores. En el caso de flotas de largo recorrido que requieren recargas simultáneas, se prevé que algunas estaciones de carga deban ofrecer hasta 20 MW de potencia.

Estas necesidades surgen en escenarios donde la carga simultánea de varios HDEV es necesaria. Para dimensionar la magnitud de la demanda energética, cargar de 4 a 5 HDEV simultáneamente equivale a la carga de aproximadamente 100 vehículos eléctricos ligeros (NREL, 2025). Esta comparación destaca la presión que las estaciones de alta capacidad ejercen sobre la red eléctrica y la necesidad de infraestructura robusta para gestionar estas demandas.

6.2. Gestión Inteligente de la carga y optimización de la infraestructura

Un aspecto crítico para garantizar la viabilidad a largo plazo de la electrificación del transporte es la gestión inteligente de la carga. Esta tecnología ajusta el flujo de electricidad según las necesidades de cada vehículo y las condiciones de la red eléctrica, lo que resulta esencial en momentos de alta demanda (NREL, 2025). Los sistemas avanzados de control permiten programar las cargas, priorizar rutas o vehículos según la urgencia operativa y distribuir la energía de manera eficiente para evitar sobrecargas en la red.

La implementación de infraestructura sin un sistema de control adecuado puede tener efectos adversos tanto en la red eléctrica como en los costos operativos de las estaciones de carga. Si las estaciones no están correctamente dimensionadas y gestionadas, pueden provocar sobrecargas durante los picos de demanda, incrementando los costos de la energía y comprometiendo la estabilidad de la red. Estos sistemas permiten que las estaciones de carga sean flexibles y se adapten a las necesidades de los vehículos y a la disponibilidad de fuentes renovables, como la energía solar o los sistemas de almacenamiento de energía.

6.3. Integración de la red eléctrica con vehículos (V2G)

Una innovación clave para el futuro de la infraestructura de carga es la integración bidireccional de los vehículos con la red eléctrica. Esta tecnología permite que los vehículos eléctricos no solo extraigan energía de la red, sino que también puedan devolver energía en momentos de alta demanda. Aunque la aplicación de esta tecnología en HDEV aún no está ampliamente documentada, se espera que estos vehículos actúen como "baterías móviles", contribuyendo a estabilizar la red

eléctrica y equilibrar la oferta y la demanda en tiempo real (NREL, 2025). Canadá, por ejemplo, realizó su primer piloto de V2G con MHDEV en diciembre de 2023³³.

La capacidad de almacenar y devolver energía puede reducir significativamente los costos de infraestructura y mejorar la eficiencia del sistema eléctrico. Con ello, se optimizaría el uso de la infraestructura de carga, minimizando el impacto de los picos de demanda y facilitando la integración de fuentes de energía renovable. A medida que crece la adopción de vehículos eléctricos pesados, el desarrollo e implementación de la tecnología V2G será fundamental para garantizar una red más flexible y sostenible tanto en el largo plazo como en la transición hacia la electrificación del transporte.

6.4. Interoperabilidad y Estandarización Global de Cargadores

La interoperabilidad de los sistemas de carga es un componente esencial para el éxito en la adopción de HDEV. El desarrollo del estándar MCS facilita la creación de infraestructuras universales compatibles con una amplia variedad de modelos de vehículos, independientemente del fabricante. Esta estandarización garantiza que las estaciones de carga sean accesibles para todos los vehículos comerciales, lo que fomenta la expansión, disminuye costos y aumenta la confiabilidad de la red (NREL, 2025). La estandarización para el sector de carga simplifica procesos de mantenimiento, hace que la actualización de estaciones sea menos dispendiosa y contribuiría a un despliegue más rápido de la misma.

6.5. Integración de Energías Renovables y Almacenamiento en la Infraestructura de Carga

Una tendencia clave en la evolución de la infraestructura de carga es la integración de fuentes de energía renovable y sistemas de almacenamiento. Iniciativas como el proyecto eCHIP (*High-Power Electric Vehicle Charging Hub Integration Platform*) buscan desarrollar soluciones de carga directa en corriente continua, eliminando las pérdidas asociadas con la conversión de corriente alterna a continua (USDOE, 2024).

La incorporación de paneles solares y sistemas de almacenamiento permite que las estaciones de carga operen de forma más autónoma, reduciendo la presión sobre la red eléctrica durante los picos de demanda. Este enfoque no solo mejora la eficiencia energética, sino que también reduce los costos operativos al aprovechar la energía renovable cuando está disponible (USDOE, 2024). A largo plazo, la combinación de infraestructura de carga avanzada con fuentes de energía renovable y almacenamiento desempeñará un papel fundamental en la sostenibilidad y resiliencia del sistema de carga para HDEV.

6.6. Seguridad Operativa

En términos de seguridad, la mayoría de los aspectos relacionados con el hardware y equipos están regulados desde la parte eléctrica. No obstante, el crecimiento de la demanda de vehículos eléctricos ha aumentado la importancia de garantizar la seguridad física y operativa en las estaciones de carga. Implementar diseños que prioricen la seguridad no solo protege a los usuarios y al equipo, sino que también mejora la experiencia del cliente y fomenta la fidelización (Joint Office, 2024).

³³ Canada tests its first V2G for medium and heavy-duty EVs. Se puede consultar en <https://www.smart-energy.com/industry-sectors/electric-vehicles/canada-tests-its-first-v2g-for-medium-and-heavy-duty-evs/>

6.6.1. Elementos de diseño para mejorar la seguridad en estaciones de carga

Al planificar estaciones de carga públicas, es fundamental considerar elementos de diseño que mejoren la seguridad física y la protección de los usuarios. La ubicación y el contexto de la estación determinarán qué medidas de seguridad son más adecuadas, ya que no todos los sitios requieren las mismas soluciones.

Aunque estos elementos pueden aumentar los costos del proyecto, es importante mantener la flexibilidad en el diseño para priorizar las necesidades específicas de cada lugar y ofrecer una experiencia de carga más segura y cómoda (Joint Office, 2024).

A continuación, se presentan los elementos más relevantes a considerar para la mejora de la protección y la experiencia en estos espacios de acuerdo con la guía de la Joint Office (Joint Office, 2024):

- **Accesibilidad:** Garantizar espacios de carga accesibles y rutas de acceso conforme a las recomendaciones del U.S. Access Board³⁴ y a los códigos estatales y locales aplicables.
- **Iluminación:** Instalar iluminación adicional si es necesario, priorizando luces LED a escala peatonal para mantener bien iluminada la zona de carga y mejorar la percepción de seguridad.
- **Ubicación de las estaciones:** Situar las estaciones de carga en áreas de alto tránsito peatonal o vehicular con líneas de visión abiertas para facilitar la vigilancia natural. Evitar ubicarlas en zonas ocultas o detrás de edificios. Además, considerar estructuras de cubierta para proteger a los usuarios en **condiciones climáticas adversas como lluvia o nieve.**
- **Vigilancia:** Instalar cámaras de seguridad para monitorear la estación y disuadir actos de vandalismo. Mejorar la eficacia de la vigilancia añadiendo señalización que informe que el área está bajo supervisión 24/7.
- **Servicios y comodidades:** Ubicar las estaciones de carga cerca de instalaciones con personal (por ejemplo, tiendas o estaciones de servicio) que estén abiertas durante el horario de carga, brindando mayor seguridad y comodidad a los usuarios.
- **Botón de emergencia:** Disponer de cajas de llamadas de emergencia para que los usuarios puedan solicitar ayuda en caso de incidentes, especialmente en áreas con cobertura celular limitada. También se puede proporcionar Wi-Fi o servicio celular mejorado para facilitar las comunicaciones.
- **Cercado de equipos eléctricos:** Proteger la infraestructura eléctrica (como transformadores y paneles de control) mediante vallas con acceso bloqueado, evitando el ingreso no autorizado y reduciendo riesgos de manipulación indebida.
- **Equipos resistentes a manipulaciones:** Utilizar componentes con protección contra vandalismo, como tornillos a prueba de manipulación, hardware antivandálico, recubrimientos antigrafiti y cierres de seguridad en los puntos de carga.
- **Paisajismo y visibilidad:** Mantener la vegetación baja (máximo 60 cm) cerca de las estaciones para garantizar la visibilidad y facilitar la vigilancia. Incluir la gestión del paisaje en los planes de mantenimiento para asegurar que los arbustos y matorrales no obstaculicen la vista.

³⁴ Se puede consultar en: <https://www.access-board.gov/tad/ev/>

- **Limpieza del área:** Mantener el sitio limpio y libre de basura, ya que los desechos no solo deterioran la imagen del lugar, sino que también pueden atraer fauna y generar riesgos para los usuarios.
- **Pago seguro:** Proteger la información de los usuarios ofreciendo opciones de pago sin contacto y servicios automatizados como números gratuitos o SMS que permitan iniciar la carga y realizar pagos de manera segura.
- **Capacitación del personal:** Entrenar al personal in situ para responder ante emergencias y monitorear las estaciones de carga, garantizando así la seguridad de los usuarios y el correcto funcionamiento de la infraestructura.

Estos elementos no solo mejoran la seguridad y la experiencia del usuario, sino que también fortalecen la confianza en la infraestructura y fomentan un entorno más seguro y eficiente.

6.6.2. Normas y protocolos de seguridad

Consideraciones adicionales al seleccionar e instalar equipos de carga para vehículos eléctricos

Al elegir e instalar equipos de carga para vehículos eléctricos, es fundamental tener en cuenta ciertos aspectos para garantizar una experiencia de carga segura y confiable. A continuación, se presentan los principales puntos a considerar.

Botón de apagado de emergencia (E-stop)

Instalar un desconectador externo para cada cargador permite al responsable del sitio cortar el suministro eléctrico en caso de emergencia. En algunas jurisdicciones, los inspectores de bomberos pueden exigir su instalación como requisito previo para la aprobación del proyecto.

Seguridad eléctrica

Los equipos de carga deben contar con un dispositivo de interrupción del circuito de carga (CCID) o un interruptor de falla a tierra (GFCI), que detienen el flujo de electricidad en caso de una sobrecarga o fallo eléctrico, reduciendo así el riesgo de descargas eléctricas.

Prevención de incendios

La instalación del equipo de carga debe cumplir con los estándares más recientes según el contexto en el que se va a instalar. En Estados Unidos, por ejemplo, se deben seguir los estándares del National Electric Code (NEC) y la National Fire Protection Association (NFPA) (Joint Office, 2024).

- **NFPA 70 (Artículo 625):** Regula los sistemas de transferencia de energía para vehículos eléctricos.
- **NFPA 88A:** Establece las normas de seguridad para la instalación de estaciones de carga en estructuras de estacionamiento.

Además, es crucial respetar los códigos de construcción y las regulaciones relacionadas con la ubicación de hidrantes y sistemas de tuberías de incendios para garantizar la seguridad en caso de emergencias.

Gestión de cables

Implementar un sistema de gestión de cables ayuda a mantener los cables organizados y a evitar que se conviertan en un riesgo de tropiezo para los usuarios o peatones que transitan por la zona.

Protección del equipo

Proteger las estaciones de carga con topes de rueda o bolardos de concreto reduce el riesgo de daños causados por vehículos que puedan impactar accidentalmente el equipo.

Estas medidas no solo garantizan el cumplimiento normativo, sino que también mejoran la seguridad y la durabilidad de la infraestructura de carga, ofreciendo a los usuarios una experiencia más segura y eficiente.

Las normas principales que rigen la protección de equipos eléctricos en la carga de vehículos eléctricos, incluyendo la protección contra la intemperie e impermeabilización, son la IEC 61851-1 para los sistemas de carga conductiva y la IEC 60529 que define los grados de protección IP para las carcasas. La IEC 61851-1 establece requisitos de seguridad eléctrica y comunicación entre el vehículo y el cargador, mientras que la IEC 60529 clasifica la protección contra la entrada de objetos sólidos y líquidos.

6.6.3. Ciberseguridad

La creciente digitalización de la infraestructura de carga de vehículos eléctricos ha incrementado las preocupaciones sobre la ciberseguridad. La comunicación entre los diversos componentes del sistema, como los puntos de carga, las plataformas de gestión (back-office) y las redes de comunicación, crea vulnerabilidades que pueden ser aprovechadas por actores malintencionados. Un ciberataque masivo a la infraestructura de carga podría tener consecuencias graves, como la interrupción del suministro eléctrico, afectando la estabilidad de la red y la movilidad de miles de usuarios (ElaadNL, 2023).

Para abordar estos riesgos, la seguridad debe ser tratada de manera integral, considerando toda la cadena de valor. Desde el diseño de los equipos hasta la gestión de las operaciones, cada actor involucrado debe aplicar medidas robustas de ciberseguridad. Los fabricantes de puntos de carga tienen la responsabilidad de garantizar que los dispositivos sean actualizables para futuras mejoras y protegidos tanto contra manipulaciones físicas como digitales. Los instaladores, por su parte, deben asegurarse de que el firmware esté actualizado, modificar las contraseñas predeterminadas y garantizar que los protocolos de comunicación, como OCPP y OCPI, utilicen cifrado y autenticación segura (ElaadNL, 2023).

En cuanto a la normativa, aunque existen iniciativas como los requisitos de ciberseguridad del USDOE, ElaadNL y el ENCS (European Network for Cyber Security), estas directrices aún son voluntarias y carecen de un marco legal obligatorio. Para garantizar la protección efectiva de la infraestructura de carga a gran escala, es fundamental avanzar hacia la creación de estándares internacionales de ciberseguridad. Estos estándares deben incluir requisitos claros para la certificación de equipos, definir protocolos de comunicación seguros y exigir auditorías periódicas para verificar el cumplimiento.

7. Lineamientos y recomendaciones para diseño de estaciones de carga

Guías o estándares mexicanos para estaciones mixtas

En México no existe una normativa específica que regule la instalación de electrolinerías en estaciones de servicio existentes. Sin embargo, el IMT ha publicado el documento “*Estudios sobre los sistemas de recarga y tecnologías para la electrificación del autotransporte*” (IMT, 2024), en el que se establecen ciertos lineamientos relevantes.

Uno de los requisitos que destaca es mantener una distancia mínima de 15 metros medidos desde el eje vertical del dispensario entre los cargadores y las áreas de despacho de combustibles, como lo establece la NOM-005-ASEA-2016³⁵. Esta medida de seguridad busca minimizar riesgos asociados con la proximidad de sistemas eléctricos y combustibles inflamables.

Otro aspecto esencial en el diseño y operación de las electrolinerías es la compatibilidad con distintos estándares de conectores. La regulación vigente exige que estas estaciones sean capaces de admitir al menos dos tipos de conectores comercializados en México, incluyendo los principales estándares internacionales: norteamericano (SAE), europeo (IEC) y asiáticos (GB/T y CHAdeMO) (CRE, 2024). Esta versatilidad permite ofrecer servicio a una mayor cantidad de usuarios, independientemente de la marca o procedencia de sus vehículos.

En cuanto a la estructura de precios, las electrolinerías tienen libertad para establecer sus tarifas bajo distintos esquemas, siempre que sean comunicadas de manera clara a los usuarios. Estas pueden basarse en el consumo energético (\$/kWh), en el tiempo de uso (\$/h o \$/min) o en tarifas por periodo (semanal, mensual o anual), una opción especialmente útil para usuarios frecuentes (CRE, 2024).

Además, las electrolinerías ubicadas en vías públicas deben contar con señalización conforme a la Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEDE-2012³⁶ con el objetivo de facilitar su identificación y acceso para los conductores.

7.1. Algunas guías de diseño en el contexto estadounidense

En noviembre de 2012, la Autoridad de Investigación y Desarrollo Energético del Estado de Nueva York publicó la guía “*Siting And Design Guidelines For Electric Vehicle Supply Equipment*”. En esta guía, no se consideraban aún las estaciones de carga para MHDEV, pero sí se consideraba la instalación de infraestructura de carga para vehículos eléctricos ligeros en estaciones de servicio.

La guía establece lineamientos para la instalación de estaciones de carga en recintos comerciales, considerando aspectos como señalización, servicio al cliente y sistemas de gestión energética. Además, aclara que, aunque existe la percepción de que la proximidad entre sistemas eléctricos y combustibles fósiles podría representar un riesgo elevado, este escenario no supone un peligro significativo siempre que se cumplan estrictamente las medidas de seguridad y accesibilidad.

Entre las medidas esenciales se incluyen una correcta conexión a tierra, la separación adecuada entre los puntos de carga y los surtidores de combustible, así como el uso de equipos certificados e instaladores capacitados que cumplan con los códigos eléctricos nacionales y las especificaciones del fabricante.

³⁵ Diseño, construcción, operación y mantenimiento de Estaciones de Servicio para almacenamiento y expendio de diésel y gasolinas.

³⁶ Es la norma para Instalaciones Eléctricas (utilización)

Se establece que la instalación de infraestructura de carga para vehículos eléctricos en estaciones de servicio debe cumplir con los lineamientos generales aplicables a recintos comerciales³⁷, incorporando consideraciones adicionales específicas para garantizar la seguridad y eficiencia del sistema (NYSERDA, 2012). Los lineamientos principales considerados en estas directrices se encuentran compilados en la Tabla 12.

Tabla 12. Consideraciones para la instalación de cargadores de vehículos eléctricos en Gasolineras según la guía de NYSERDA.

| Consideración | Descripción |
|--|--|
| Prioridad de carga rápida en corriente continua (DC) | La opción más adecuada para estaciones de servicio son los cargadores rápidos de corriente continua (DC). Estos permiten a los clientes recargar sus vehículos de manera rápida mientras están en tránsito, haciendo que la velocidad y la conveniencia sean factores clave en este contexto. |
| Espacios Exclusivos para la Carga de Vehículos Eléctricos | Se deben instalar centros de carga de vehículos eléctricos en áreas dedicadas, separadas de las estaciones de repostaje de gasolina. Esto minimiza los riesgos percibidos y garantiza una experiencia de carga eficiente y segura para los conductores de vehículos eléctricos. Además, asegura la accesibilidad al evitar que vehículos de combustión ocupen estos espacios, manteniendo un flujo de tráfico ordenado y disponibilidad de carga. Asimismo, la ubicación de los equipos de carga no debe obstruir el acceso a los surtidores de combustible. |
| Señalización y Marcas en el Pavimento | Se deben colocar carteles claros, como "Solo vehículos eléctricos" y marcas en el pavimento, para indicar las zonas de carga, evitando confusiones. También se deben colocar carteles de advertencia para destacar posibles peligros. |
| Protección a la intemperie | La instalación de protección climática, como marquesinas, para cargadores rápidos de CC en ubicaciones al aire libre no solo brinda comodidad al cliente, sino que también sirve como una medida de seguridad fundamental para el equipo eléctrico. |
| Iluminación adecuada | Asegúrese de que haya suficiente iluminación en el área de carga para mejorar la visibilidad y la seguridad tanto de los usuarios como de los operadores, especialmente durante la noche. |
| Cumplimiento de los códigos eléctricos | Todas las instalaciones deben cumplir con las normas eléctricas y de construcción locales, incluida la conexión a tierra adecuada, la protección contra sobre corriente y el uso de interruptores de desconexión para cargadores de alta potencia. |
| Sistemas de gestión energética | Para manejar las altas demandas energéticas de los cargadores rápidos, se recomienda implementar sistemas de gestión energética que optimicen el uso de la electricidad, reduzcan costos y gestionen los períodos de carga pico. |

³⁷ Se puede consultar en https://www.transportationandclimate.org/sites/default/files/EV_Siting_and_Design_Guidelines.pdf

Asociarse con redes de carga de VE o CPOs

Las estaciones de servicio deberían considerar asociarse con redes establecidas o crear sus propios modelos de cobro por cobro para administrar los pagos y garantizar una experiencia fluida para el cliente.

Servicios para el cliente

Ofrecer servicios a los clientes, como zonas de descanso o cafeterías, es fundamental, ya que los conductores de vehículos eléctricos pueden tener que esperar hasta 30 minutos mientras se carga el vehículo. Es posible que las estaciones de servicio estándar tengan que ampliar las tiendas de conveniencia para ofrecer servicios adicionales para estas estancias más prolongadas.

Fuente: Tomado y adaptado de NYSERDA.

Estas directrices, publicadas hace más de diez años, mencionan los desafíos que la electrificación de flotas podría enfrentar para lograr el despliegue de una red de infraestructura de carga en ubicaciones existentes (gasolineras). Asimismo, se habla de forma muy general de algunos lineamientos básicos para los diseños orientados a MDEV sin profundizar en detalles (ver Figura 21).

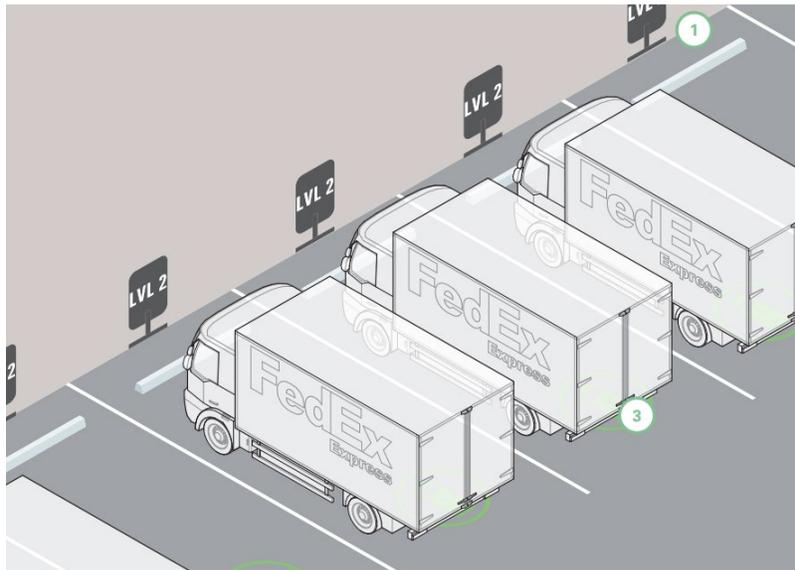


Figura 21. Directrices de diseño y ubicación para estacionamiento de flotas comerciales. Fuente: NYSERDA³⁸.

El 28 de febrero de 2023, la FHWA publicó en el Registro Federal los estándares y requisitos para la infraestructura de carga de vehículos eléctricos financiada bajo el Programa NEVI. Estas regulaciones establecen lineamientos para la instalación, operación, mantenimiento e interoperabilidad de la infraestructura, con el objetivo de garantizar una red de carga accesible, confiable y estandarizada en Estados Unidos (FHWA, 2023). Aunque el documento no impone estándares específicos para la carga de HDEV, permite su implementación sin restricciones regulatorias adicionales, favoreciendo la innovación y expansión de esta tecnología

³⁸ Se puede consultar en https://www.transportationandclimate.org/sites/default/files/EV_Siting_and_Design_Guidelines.pdf

7.1.1. Consideraciones para vehículos eléctricos medianos y pesados (MD/HD EVs)

Aunque la regulación se enfoca principalmente en infraestructura de carga para vehículos ligeros, se reconoce la importancia de abordar las necesidades específicas de los MHDEV. En la Sección 680,102 (Aplicabilidad), se establece que la FHWA decidió **no incluir estándares mínimos específicos para la carga de MHDEV** en esta fase. La razón principal es evitar que una regulación prematura limite el ritmo de la innovación tecnológica en el sector. Esta decisión no impide la implementación de tecnologías para MHDEV donde no estén prohibidas (FHWA, 2023).

En este sentido, el documento menciona varias consideraciones clave para la carga de vehículos pesados:

- **Ubicación estratégica de estaciones:** Se sugiere que las estaciones de carga para MHDEV sean ubicadas en puntos alineados con los tiempos de descanso de los conductores de camiones de larga distancia, optimizando así la logística de carga y tiempos de operación.
- **Requisitos de potencia:** Dado que los MHDEV requieren una infraestructura de carga con mayor capacidad, se recomienda que las estaciones sean diseñadas para soportar altos niveles de potencia.
- **Espacios de carga adaptados:** Se menciona la necesidad de contar con espacios de paso más amplios y accesibles para vehículos de mayor tamaño, incluyendo radios de giro adecuados para facilitar la maniobrabilidad.

A pesar de que estas recomendaciones no son requisitos obligatorios en esta versión de la normativa, la FHWA reconoce que el despliegue de infraestructura para MHDEV es crucial para la electrificación del transporte de carga.

7.1.2. Estándares generales para infraestructura de carga

Las regulaciones establecen lineamientos técnicos y operativos que deben cumplir las estaciones de carga financiadas con fondos federales. Algunos de los más relevantes incluyen:

- **Accesibilidad y disponibilidad pública:** Las estaciones deben estar operativas las 24 horas del día, los 7 días de la semana, todo el año.
- **Interoperabilidad:** Los cargadores deben ser compatibles con múltiples fabricantes y cumplir con estándares de comunicación de red abiertos.
- **Métodos de pago universales:** Las estaciones deben aceptar pagos sin contacto y no pueden exigir membresías exclusivas para utilizar los servicios de carga.
- **Transparencia en precios:** La tarifa de carga debe mostrarse claramente antes de que el usuario inicie la sesión de carga.
- **Recopilación y publicación de datos:** Se requiere que la información sobre la ubicación, disponibilidad en tiempo real y precios de las estaciones sea accesible en plataformas de mapeo y navegación.

Aunque los estándares no se imponen como obligatorios, dejan abierta la puerta para su desarrollo y despliegue sin restricciones regulatorias innecesarias, lo que representa una partida de base útil para la expansión de la infraestructura de carga de MHDEV.

Black & Veatch³⁹ también tiene documentos con lineamientos aplicables al diseño de infraestructura de carga para HDEV. Estos lineamientos son únicamente de referencia y no están destinados a la construcción (ver Figura 22).



Figura 22. Diseño hipotético de abastecimiento equipado con MCS. Fuente: Black & Veatch

En estos documentos se resalta que es importante tener definidos los radios de giro de los camiones de mayor tamaño que planean hacer uso de la infraestructura, así como reservar espacios adecuados para los cuartos de máquinas y el equipamiento necesario para el MCS. A modo de

³⁹ Empresa dedicada al desarrollo de infraestructuras de transporte limpio, con experiencia en el desarrollo de estaciones de carga para EVs (más de 1,300 y la primera red de hidrógeno en Estados Unidos).

referencia, el plano hipotético de la tubería conduit para el diseño propuesto en la Figura 22 se vería como se ilustra en la Figura 23.

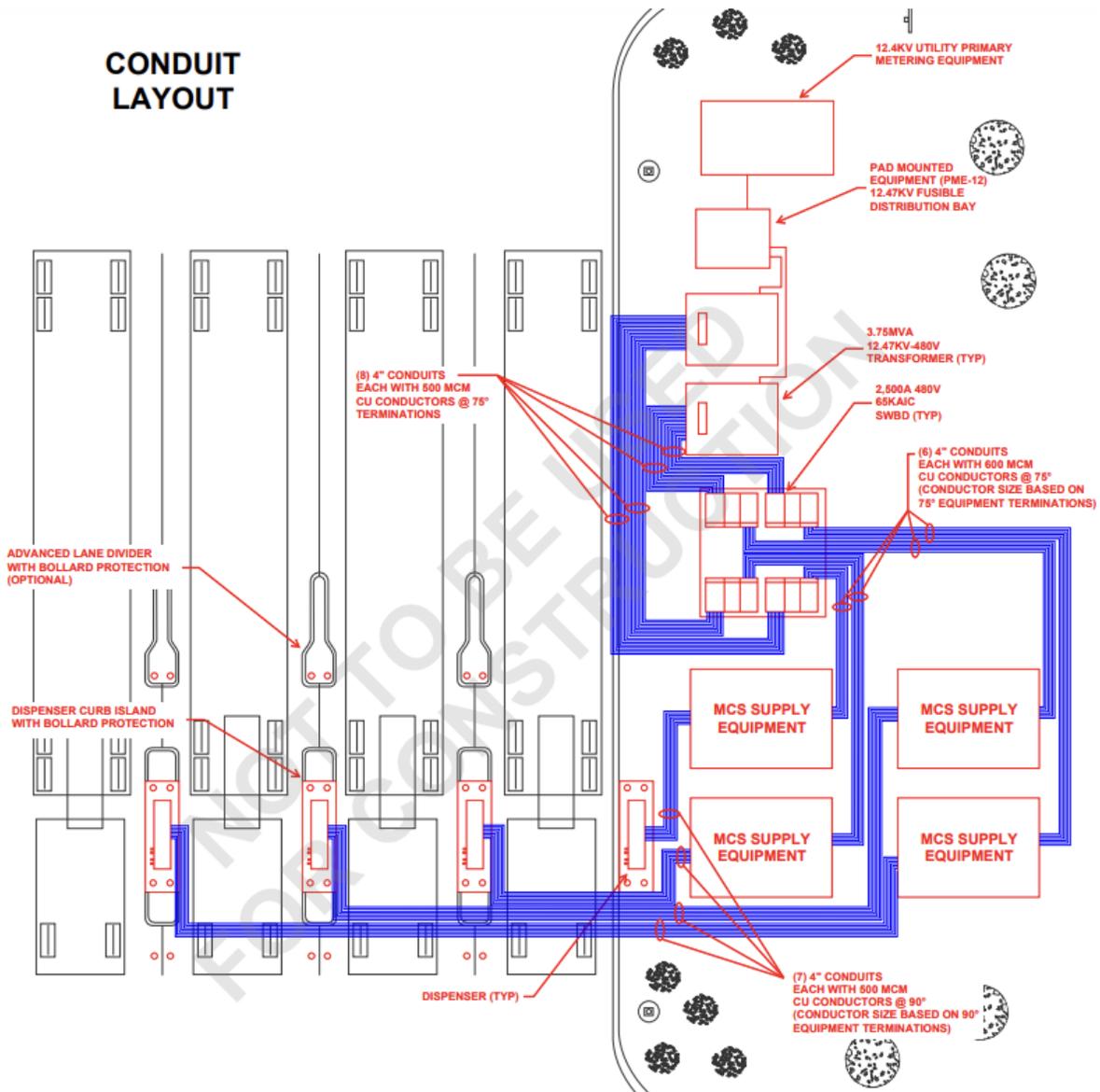


Figura 23. Disposición de cableado para el diseño hipotético con MCS. Fuente: Black & Veatch

Debe tenerse en cuenta que hay distintas empresas y entes dedicados al desarrollo de estaciones de carga dentro de Estados Unidos, y los ejemplos acá mostrados sólo son de referencia para su análisis y consideración.

7.2. Información base para diseño de estaciones de carga en la UE

Dentro de la UE, como se ha mencionado en el apartado de su caso de estudio, existen CPOs que se dedican al diseño y despliegue de infraestructura de carga para HDEV. Milence, por ejemplo, es uno de los que tiene proyectado el despliegue e instalación de 1,700 puntos de recarga públicos en toda Europa para finales del 2027 (Milence, s.f.). No obstante, aunque se encargan del diseño de las estaciones, no disponen de guías de acceso público que detallen los lineamientos o criterios que

siguen. Según la propia empresa, todas las estaciones que implementarán deben cumplir con elementos mínimos comunes, como los que se presentan en la Figura 24.

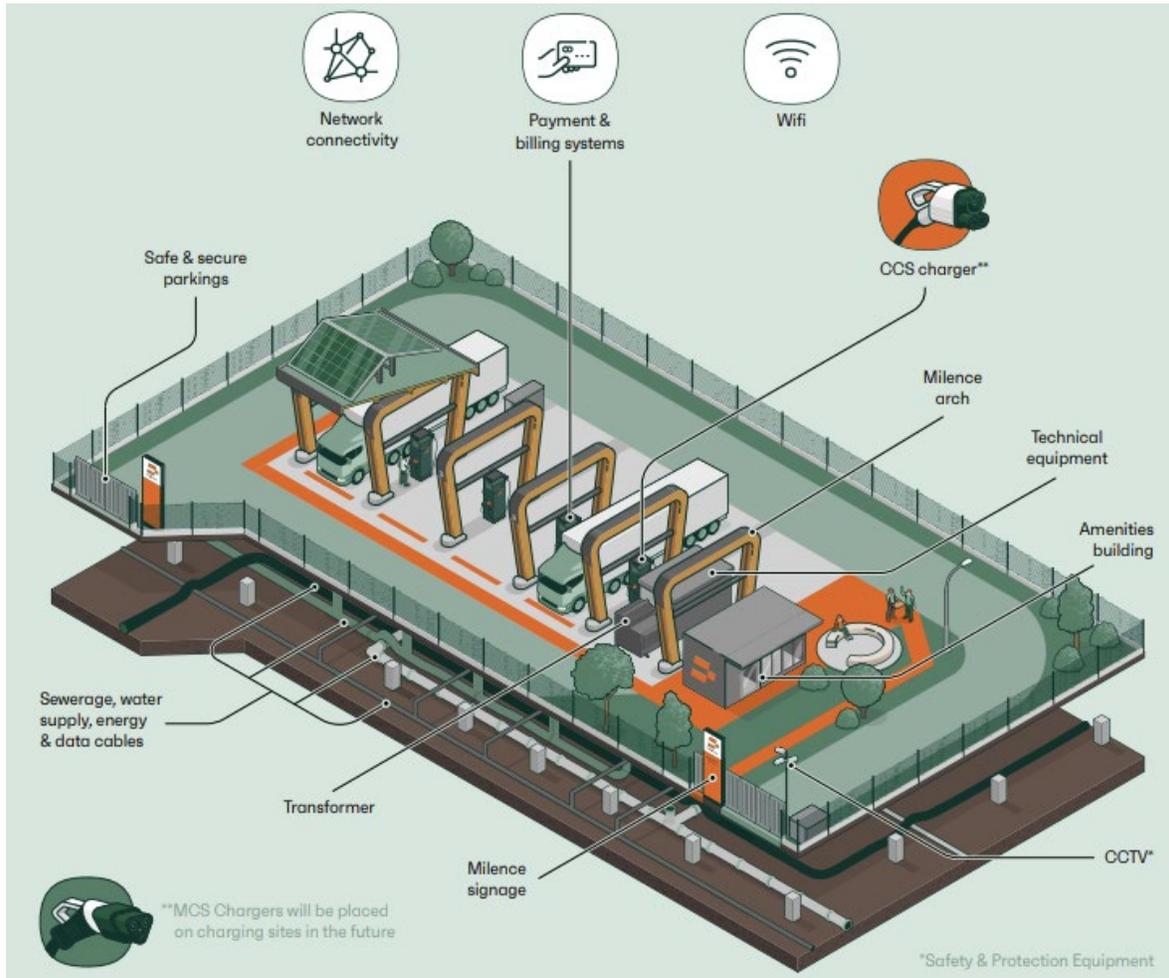


Figura 24. Componentes mínimos del ecosistema de carga en las estaciones de Milence. Fuente: Milence.

Por otra parte, en marzo de 2024, el Instituto Fraunhofer de Investigación de Sistemas e Innovación, con financiación del Ministerio Federal de Asuntos Digitales y Transportes (Bundesministerium für Digitale und Verkehr, BMDV por sus siglas en alemán) publicó en Karlsruhe un informe sobre el proyecto "Hochleistungsladen im Lkw-Fernverkehr" (Carga de Alta Potencia para Camiones de Larga Distancia). Este documento presenta los primeros hallazgos relacionados con los desafíos y soluciones en la implementación del sistema MCS para el transporte de larga distancia, en el marco del proyecto HoLa descrito previamente.

Dentro de este documento se hace hincapié en que la estandarización del diseño de las estaciones de carga es clave para acelerar su implementación y garantizar una experiencia de uso sencilla y uniforme para los conductores. Por ello, es importante considerar aspectos como la optimización del espacio de estacionamiento, la facilidad de expansión, la combinación de carga rápida y lenta, y la accesibilidad para otros tipos de vehículos es fundamental (Fraunhofer ISI, 2024).

En el marco del proyecto HoLa, se han desarrollado borradores de diseños estándar a partir de consultas con partes interesadas, así como de simulaciones y análisis propios. La Figura 25 muestra un ejemplo de dichos borradores con instalaciones de carga en formato *drive-through*, mientras que el diseño propuesto en la Figura 26 cuenta con formato con una zona de espera separada.

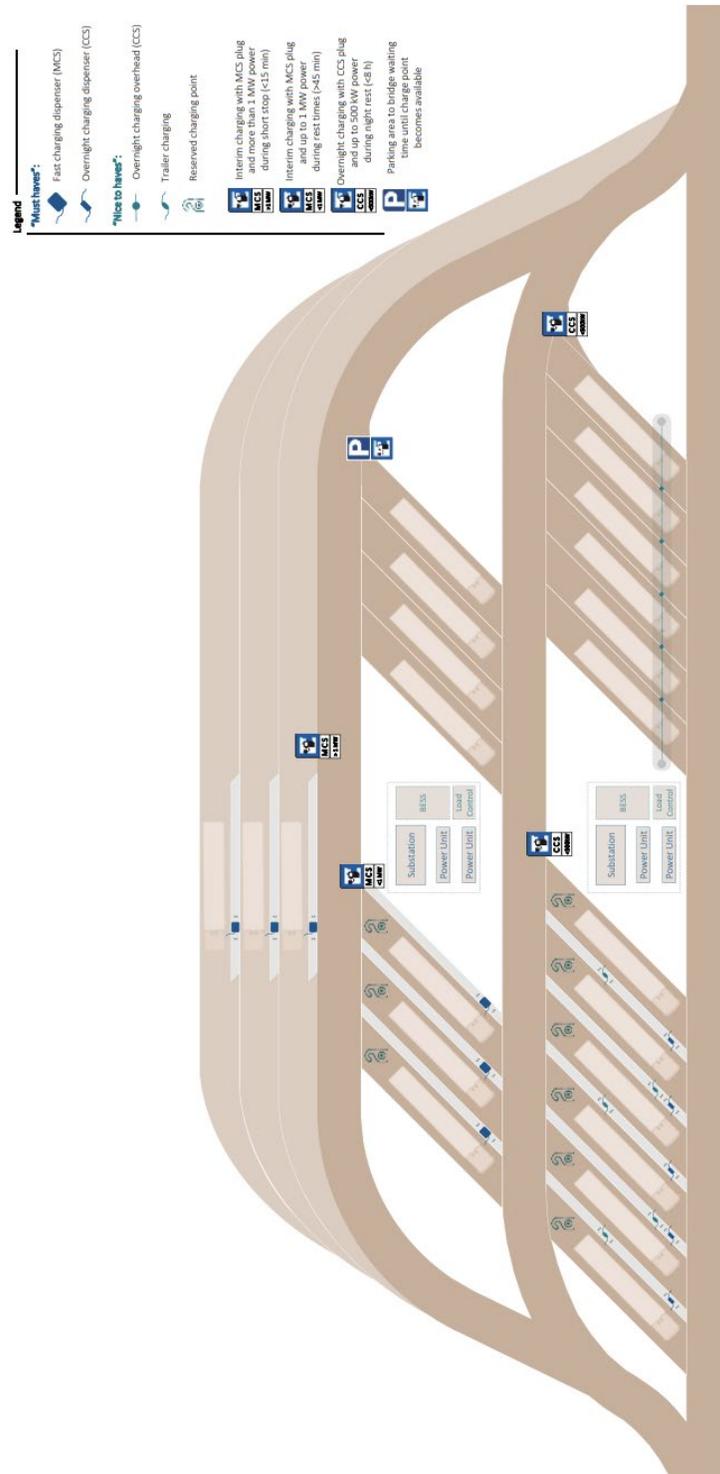


Figura 25. Propuesta de diseño estándar tipo 1 para estaciones de carga de camiones en autopistas. Fuente: Consorcio HoLa

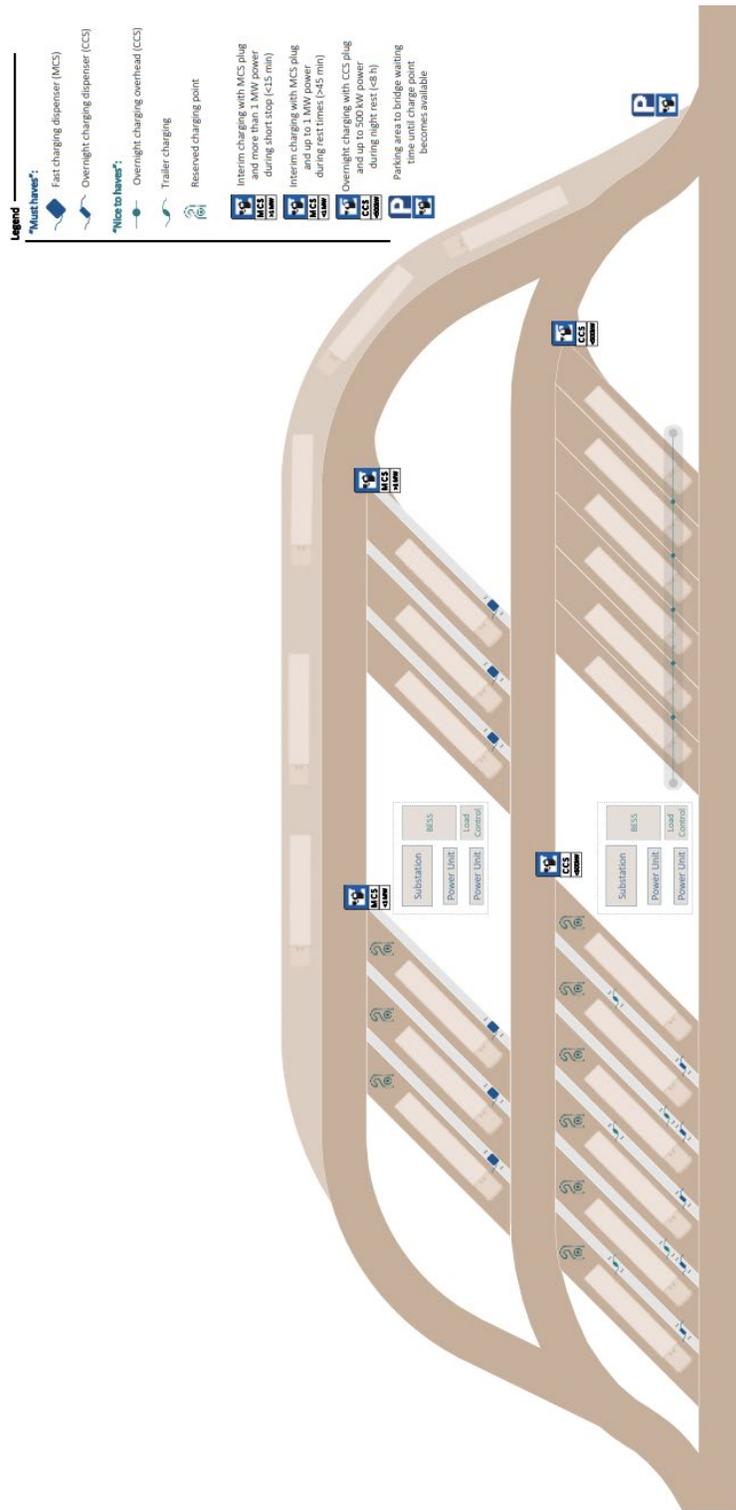


Figura 26. Propuesta de diseño estándar tipo 2 para estaciones de carga de camiones en autopistas. Fuente: Consorcio HoLa

Ambos ejemplos presentan una estación de carga de gran tamaño con más de seis puntos de carga. Al acceder a la estación (desde la derecha en la ilustración), se resalta la importancia de una señalización clara y visible que facilite la identificación de la ubicación de la estación. Aunque existen diversas opciones de diseño para la señalización, es fundamental que los conductores puedan distinguir fácilmente los puntos de carga CCS y MCS.

Cabe destacar que, según un acuerdo de la industria, la toma MCS siempre estará ubicada en el lado izquierdo del vehículo en la dirección de marcha, mientras que la toma CCS puede encontrarse en el lado izquierdo o derecho (Fraunhofer ISI, 2024). Además, para las dos propuestas (tanto la de la Figura 25 como la de la Figura 26) se considera una opción compacta sin islas de carga, con sistemas de carga de baja potencia, como la carga nocturna mediante cables suspendidos desde arriba, la cual se encuentra en la esquina inferior derecha de las dos propuestas (en sentido horizontal).

Adicionalmente, el diseño debe considerar el espacio necesario para transformadores y, en algunos casos, sistemas de almacenamiento con baterías o gestión de carga. A través de simulaciones y consultas con diversas partes interesadas, el informe financiado por BMDV identificó aspectos clave para el diseño de estaciones de carga pública para camiones eléctricos, los cuales clasifican en requisitos esenciales (Must Haves) y requisitos deseables (Nice to Haves).

Algunos de estos elementos ya están bien definidos y documentados, otros aún requieren un análisis más profundo y están sujetos al contexto de aplicación. La Tabla 13 ofrece un resumen de los aspectos identificados para el diseño de estas estaciones.

Tabla 13. Aspectos clave en el diseño de una estación de carga pública para camiones según el estudio el BMDV.

| No. | Requisitos esenciales (Must Haves) | Requisitos deseables (Nice to Haves) |
|-----|---|--|
| 1 | Todas las opciones de carga deben diseñarse para utilizar el menor espacio de estacionamiento posible para los camiones. Tener en cuenta las limitaciones espaciales. | La carga CCS nocturna se puede implementar con cables largos ubicados en la parte superior como solución aérea o desde estaciones de carga regulares; la solución aérea requiere menos espacio. |
| 2 | El conector MCS está ubicado en el lado izquierdo del vehículo (en la dirección de viaje), mientras que el CCS puede estar en el lado izquierdo o derecho. | El diseño del sitio de carga para CCS debe considerar las dimensiones de los vehículos con el conector ubicado tanto en el lado izquierdo como en el derecho. |
| 3 | Se requerirán tanto cargadores lentos para carga nocturna como cargadores MCS intermedios. Aunque la proporción no es exacta, la duración de las paradas sugiere que habrá más puntos de carga nocturna que de MCS por ubicación. | Se estima una proporción aproximada de 4:1 entre los puntos de carga nocturna y los de MCS, la cual deberá ajustarse conforme se disponga de datos públicos o empíricos. |
| 4 | El acceso y la salida en línea recta de los espacios de carga son la opción más conveniente, especialmente para la carga intermedia con MCS. Se recomienda proyectar en el diseño una salida frontal para mayor eficiencia y seguridad. | Para CCS, se debe evaluar la interoperabilidad con automóviles de pasajeros, especialmente para el caso de vehículos con remolque. |
| 5 | Una señalización vial clara y específica es esencial para la carga nocturna de camiones y la carga intermedia con MCS, asegurando que los conductores puedan identificar fácilmente la disponibilidad y ubicación de los puntos de carga. | La gestión de carga y el almacenamiento de baterías estacionarias pueden reducir la demanda de conexión a la red y optimizar su uso; sin embargo, su diseño debe garantizar la viabilidad económica y la rentabilidad. |

| | | |
|----|---|--|
| 6 | Las ubicaciones deben ser compatibles con camiones de hasta 4m de altura y 40 Ton de peso bruto, considerando el espacio necesario para maniobras y su radio de giro. | Posibilidad adicional de carga para remolques, dependiendo de la tecnología utilizada, que aún no está estandarizada. |
| 7 | Es necesaria una gestión adecuada de los cables en los dispensadores y la solución de puente de carga para facilitar su manipulación y evitar que queden colgando. | Se debe reservar suficiente espacio para futuras actualizaciones y aumento de puntos de carga. |
| 8 | Por razones de seguridad, la subestación, la unidad de potencia, el sistema de almacenamiento de energía en baterías (BESS) y la gestión de carga deben ubicarse fuera del área de estacionamiento. | Se prefieren soluciones innovadoras que reduzcan el espacio requerido, como el uso de puentes de carga. |
| 9 | Se requiere la instalación de dispositivos de protección o anticollisión para evitar daños significativos a los cargadores | El uso de puentes de carga requiere esfuerzos adicionales debido a la necesidad de personalización según las condiciones específicas del sitio. |
| 10 | Es fundamental disponer de un área de espera, especialmente en las primeras etapas, cuando el sistema de reservas aún no está maduro y la disponibilidad de puntos de carga es limitada. | La posibilidad de reservar puntos de carga puede mejorar la previsibilidad para los operadores logísticos cuando la demanda de carga es alta. |
| 11 | Se debe evitar o reducir la instalación de líneas eléctricas a lo largo de las rutas de tránsito para prevenir bloqueos durante las reparaciones. | El concepto de HUB de energía, que convierte CA a CC de forma centralizada y la distribuye a los dispensadores, puede ofrecer beneficios como modularidad, escalabilidad, rentabilidad y capacidad de actualización. |
| 12 | Los estacionamientos de carga requerirán más espacio que los convencionales para garantizar suficiente espacio para la manipulación de cables. | El uso de cargadores nocturnos frente a cargadores de megavatios dependerá en gran medida de la relación costo-beneficio. |

Fuente: Consorcio HoLa

Si bien todos estos aspectos son cruciales para la concepción del diseño estandarizado de una estación de carga, también lo son los estándares y la normativa. En este sentido, y especialmente para la implementación del sistema MCS, CharIn publicó un *white paper* (CharIn, 2022) que, además de incluir recomendaciones generales, recopila las normas relevantes a considerar en las distintas etapas de diseño y planificación. Estas normas se encuentran compiladas en la Tabla 14.

Tabla 14. Resumen de normas aplicables para implementación del sistema MCS

| Norma | Descripción |
|-----------------|--|
| ISO 5474 series | Esta serie de normas se centra en los vehículos eléctricos, abordando aspectos relacionados con su diseño y funcionalidad. |
| IEC 61851-23 | Aplica al equipo de suministro de energía para vehículos eléctricos, proporcionando directrices para la transferencia de energía entre la red de suministro y los EVs. |
| IEC 61851-23-3 | Actualmente en desarrollo, esta norma complementará la IEC 61851-23, abordando requisitos específicos para sistemas de carga de alta potencia como el MCS. |

| | |
|-----------------|--|
| IEC 61851-1 | Establece los requisitos generales para los sistemas de carga conductiva de vehículos eléctricos, incluyendo características eléctricas y de seguridad. |
| IEC 62196-1 | Define los requisitos generales para conectores, bases de enchufe, acoplamientos de vehículos y entradas de vehículos para la carga conductiva de EVs. |
| IEC 62196-3 | Especifica las dimensiones y requisitos de compatibilidad para conectores y entradas de vehículos destinados a la carga en corriente continua (DC) y combinada AC/DC. |
| IEC TS62196-3-1 | Proporciona especificaciones técnicas para conectores y entradas de vehículos con sistemas de gestión térmica, permitiendo el uso de cables con secciones transversales más pequeñas mediante sensores térmicos y control dinámico de corriente. |
| IEC TS 63379 | Actualmente en desarrollo, esta norma abordará aspectos relacionados con los conectores y entradas de vehículos para sistemas de carga de alta potencia, como el MCS |
| ISO 15118-20 | Forma parte de la serie ISO 15118, que trata sobre la comunicación entre vehículos eléctricos y la infraestructura de carga, incluyendo funciones avanzadas como la carga inalámbrica y la gestión de energía. |
| ISO 15118-6 | Parte de la serie ISO 15118, esta norma se centra en la comunicación inalámbrica de proximidad para la carga de vehículos eléctricos. |
| SAE J3271 | Actualmente en desarrollo, esta norma de la Sociedad de Ingenieros Automotrices (SAE) abordará aspectos relacionados con la carga de vehículos eléctricos, posiblemente enfocándose en estándares de carga de alta potencia. |
| UL 2251 | Establece los requisitos de seguridad para conectores y acoplamientos utilizados en la carga conductiva de vehículos eléctricos. |
| UL 2231 | Proporciona requisitos de seguridad para sistemas de protección contra choques eléctricos en equipos de carga de vehículos eléctricos. |
| UL 2202 | Cubre los requisitos de seguridad para cargadores de vehículos eléctricos, incluyendo consideraciones de rendimiento y construcción. |

Fuente: Elaboración propia a partir de información publicada por CharIn.

Adicional a las normas que se encuentran en este listado, se debe tener en cuenta la IEC 60529 para la clasificación de protección IP, y otras normativas que aseguran la resistencia de la infraestructura frente a factores ambientales.

8. Revisión Regional: América Latina

8.1. Visión General

En América Latina, la adopción de HDEVs aún no ha alcanzado los niveles observados en Estados Unidos o la Unión Europea. Hasta ahora, la mayoría de los vehículos eléctricos adquiridos y los planes estratégicos de electrificación se han centrado principalmente en el transporte público. Esto incluye la implementación de sistemas como los BRTs (*Bus Rapid Transit*, por sus siglas en inglés) y vehículos ligeros, lo que también ha favorecido el despliegue de la electrificación en la categoría de vehículos de carga media (MDEV). En el ámbito de los HDEV, se han realizado algunos proyectos piloto, pero aún no existen planes concretos ni Mapas de Ruta claros para la electrificación del transporte de carga. En algunos contextos, se continúa hablando de la descarbonización (el uso de energías menos contaminantes), pero no específicamente de electrificación.

A nivel regional, algunos países latinoamericanos han desarrollado su propia estrategia nacional con enfoques y terminologías diversas. Por ejemplo, Colombia y Chile han desarrollado sus respectivas iniciativas ambas denominadas como Estrategia Nacional de Movilidad Eléctrica, mientras que Costa Rica ha hecho lo propio estableciendo un marco estratégico en torno a su Plan Nacional de Transporte Eléctrico. Cada una de estas iniciativas se exponen a continuación.

8.2. Colombia

La electrificación del transporte en Colombia avanza a un ritmo mucho más lento si se compara con los casos que se han analizado previamente. Si se observa la penetración de mercado, la adopción de vehículos eléctricos para el transporte de carga en el país sigue siendo limitada, alcanzando menos del 0.05% en 2021 y solo el 0.02% de las ventas totales en 2022 (IEA, 2023) Esto contrasta con el panorama global, donde los vehículos eléctricos representaron el 1.2% de los nuevos vehículos de transporte de carga en 2022, y en China, este porcentaje fue cercano al 4% (IEA, 2023).

La flota de transporte de carga en Colombia está compuesta principalmente por camiones livianos y medianos. Más del 50% de esta flota corresponde a vehículos pre-Euro, es decir, carecen de estándares ambientales, y la edad promedio de los camiones superó los 21 años en 2024 (Wilmsmeier G, 2024).

En respuesta a estos desafíos, el Gobierno Nacional ha puesto en marcha diversas políticas públicas orientadas a promover la movilidad eléctrica y a desarrollar la infraestructura necesaria para la recarga de estos vehículos.

a. Contribuciones determinadas a nivel nacional

Colombia ha asumido compromisos ambiciosos en el marco de las Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional (NDC, por sus siglas en inglés) para reducir las emisiones. En diciembre de 2020, Colombia presentó una NDC actualizada a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), estableciendo el objetivo de reducir las emisiones en 9.7 millones de toneladas de CO₂ para 2030 solo en el sector del transporte. Las medidas de mitigación complementarias apuntan a reducir 5.7 millones de toneladas adicionales de CO₂, lo que eleva el potencial total de reducción del sector a 6.18 millones de toneladas (Ministerio de ambiente, 2020).

b. Plan Nacional de Desarrollo

El Plan Nacional de Desarrollo 2022-2026 “Colombia potencia mundial de la vida”, establece en sus bases que se crearán incentivos y fuentes de pago o mecanismos de financiación para infraestructura de carga. Adicionalmente, en la Ley 2294 de 2023 se establece la creación del fondo para la promoción de ascenso tecnológico que incluye vehículos de carga livianos, pesados y

volquetas, así como la infraestructura de recarga, cuyas subcuentas se encuentran en estructuración y operativización actualmente (DNP, 2023).

c. Documentos CONPES

Varios documentos de política pública emitidos por el Consejo Nacional de Política Económica y Social (CONPES) reflejan el compromiso de Colombia con el desarrollo sostenible y el crecimiento verde. Entre los documentos más relevantes se encuentran:

- **CONPES 3934 (2018)** – “Política de Crecimiento Verde”. Esta promueve el aumento de la productividad y la competitividad económica al tiempo que garantiza el uso sostenible de los recursos naturales, junto con la inclusión social compatible con el clima. Incluye en una de sus líneas de acción la necesidad de establecer un programa nacional de electrificación del transporte que incluya la generación de reglamentos técnicos para la infraestructura de abastecimiento, suministro y operación del transporte eléctrico, así como parámetros mínimos para los vehículos eléctricos para tener en cuenta en sus procesos de ensamble e importación.
- **CONPES 3943 (2018)** – “Política para el Mejoramiento de la Calidad del Aire”. Se orienta a la reducción de contaminantes que afectan la salud y el medio ambiente, con foco en la reducción de emisiones provenientes de fuentes móviles como el transporte de carga.
- **CONPES 3963 (2019)** – “Política para la modernización del sector autotransporte”. Delinea estrategias para promover la modernización sostenible y de largo plazo del sector autotransporte, con énfasis en incentivos económicos y fiscales.
- **CONPES 3982 (2020)**, “Política Nacional de Logística”. Busca reducir los tiempos y costos de la cadena logística, promoviendo la intermodalidad y destacando los modos de transporte menos contaminantes.
- **CONPES 4075 (2022)** – “Política de Transición Energética”. Esta política tiene como objetivo contribuir al crecimiento económico, energético, tecnológico, ambiental y social del país, con un enfoque en la seguridad y confiabilidad energética, la promoción de las fuentes de Energía Renovable No Convencional (ERNC), la mejora de la eficiencia energética y el desarrollo de nuevos combustibles, así como de tecnologías de bajas y cero emisiones. Esta política también tiene en cuenta la estrategia de movilidad eléctrica en lo que se refiere al sector transporte y establece la necesidad de estructurar el fondo de ascenso tecnológico por parte del Ministerio de Transporte.

d. Estrategia Nacional de Movilidad Eléctrica

La Estrategia Nacional de Movilidad Eléctrica 2019 (ENME)

Esta estrategia fue la primera estrategia de movilidad sostenible emitida en el país. Sirve como una guía integral, que describe varias medidas y acciones que deben implementarse para promover el uso de vehículos de bajas y cero emisiones. Esta estrategia introdujo la ambiciosa meta de incorporar 600,000 vehículos eléctricos para 2030, meta que posteriormente se incluyó en la Ley 2169 de 2021 (Minambiente, s.f.).

Aunque la ENME abarca diversos segmentos de transporte, el sector de carga ha sido identificado como prioritario debido a su impacto en las emisiones y la eficiencia logística (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2020). Se han propuesto acciones específicas para promover la adopción de vehículos eléctricos en este sector, incluyendo:

- **Marco Regulatorio:** Establecimiento de normativas que faciliten la integración de vehículos eléctricos en flotas de carga.
- **Incentivos Económicos:** Implementación de mecanismos financieros que reduzcan las barreras de entrada para empresas de transporte.
- **Lineamientos Técnicos:** Desarrollo de especificaciones que aseguren la compatibilidad y eficiencia de los vehículos eléctricos en operaciones de carga.

e. Estrategia Nacional de Transporte Sostenible 2022 (ENTS)

Tiene como objetivo principal impulsar la transición energética del sector transporte, buscando optimizar el consumo energético, modernizar el parque vehicular y fortalecer la intermodalidad. Esta estrategia se alinea con el compromiso del país ante el Acuerdo de París, orientado a reducir las emisiones de GEI en un 51% para el 2030. Además, tiene un enfoque integral para mitigar los contaminantes atmosféricos que afectan la calidad del aire en las ciudades, contribuyendo directamente a la salud pública (Ministerio de Transporte de Colombia, 2022).

Esta estrategia es el resultado de la coordinación entre diversas entidades gubernamentales a través de la Mesa Interinstitucional de Transporte Sostenible (MITS) y puede considerarse como un seguimiento de la ENME de 2019, pero con un análisis más detallado del estado de la movilidad eléctrica en el país y sus proyecciones futuras. Asimismo, establece medidas concretas que cada institución debe emprender, junto con los plazos previstos para su implementación.

Las estrategias que propone la ENTS giran en torno a cuatro Ejes estratégicos y dos Ejes transversales (ver Figura 27):

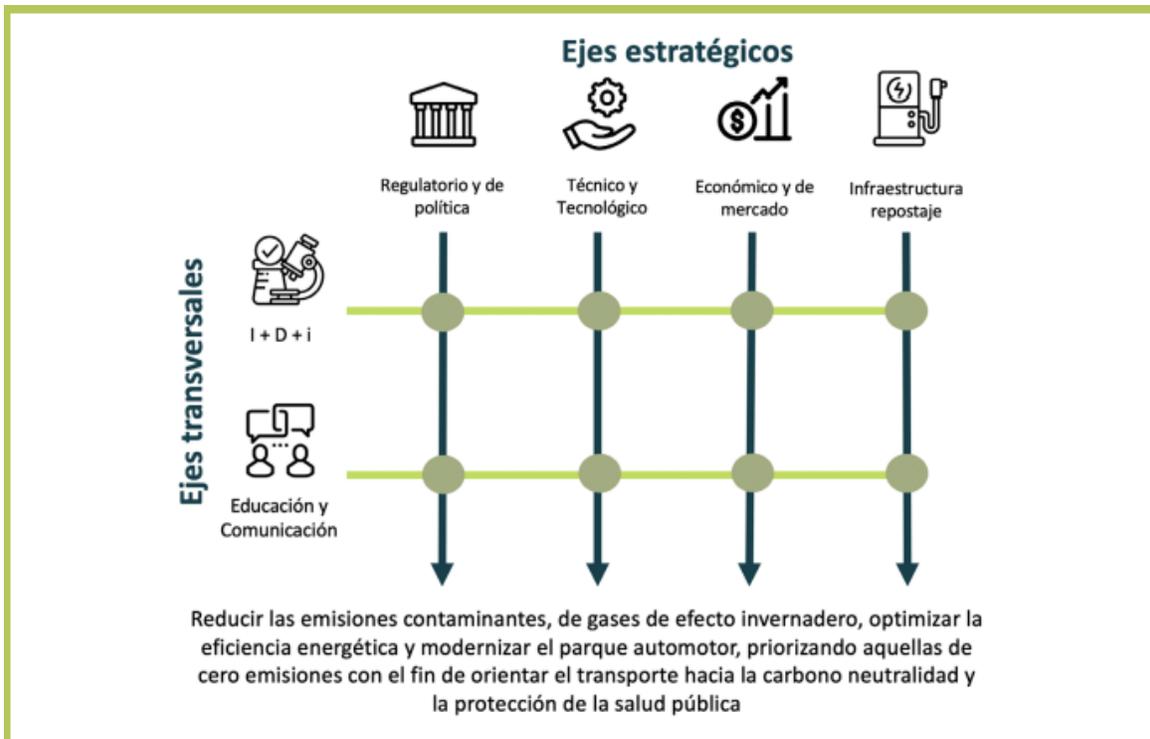


Figura 27. Ejes estratégicos y transversales de la ENTS. Fuente: Gobierno de Colombia.

EJES ESTRATÉGICOS

- **Regulatorio y de política:** Aborda la necesidad de crear o modificar normas, planes e instrumentos que incentiven nuevas fuentes de energía y el crecimiento tecnológico en el sector del transporte.
- **Técnico y Tecnológico:** Aborda los requerimientos técnicos de las tecnologías energéticas y vehiculares en los modos de transporte ferroviario, fluvial y vial.
- **Económico y de mercado:** Responde a las necesidades de financiamiento y a la evaluación e implementación de esquemas para promover el mercado hacia tecnologías energéticas y de transporte de cero y bajas emisiones.
- **Infraestructura de repostaje:** Delinea acciones enfocadas a posibilitar el desarrollo de infraestructura de carga para diferentes tipos de energía en tecnologías de cero y bajas emisiones.

EJES TRANSVERSALES

- **Investigación, Desarrollo e Innovación:** Responde a la necesidad de generación de conocimiento para una adecuada planificación e implementación de las acciones establecidas en los ejes estratégicos.
- **Educación y Comunicación:** Aborda la necesidad de desarrollo de capacidades, concientización y cambios de paradigma a nivel nacional y local para posibilitar la implementación de la ENTS (Ministerio de Transporte de Colombia, 2022).

f. Leyes, Decretos y Resoluciones

Ley 1964 de 2019: Promueve el uso de vehículos eléctricos y de cero emisiones en el país, con el objetivo de contribuir a la sostenibilidad del sector transporte y reducir las emisiones contaminantes. La Ley establece varios beneficios e incentivos para los propietarios de vehículos eléctricos, incluyendo reducción de impuestos vehiculares, descuentos en inspecciones técnicas y seguros. Además, fija metas de adquisición de autobuses eléctricos en ciudades con Sistemas de Transporte Masivo, con el objetivo de lograr una flota completamente eléctrica de autobuses urbanos para 2035. La Ley también establece cuotas mínimas de estaciones de carga rápida a ser promovidas por los municipios de categoría especial y la capital colombiana, con excepción de Tumaco y Buenaventura, y autoriza el uso de espacio público para la instalación de estaciones de carga, que pueden ser materializadas a partir de la ampliación de estaciones de combustible tradicionales (Congreso de la República de Colombia, 2019).

Ley 1972 de 2019: *"Por la cual se establece la protección de los derechos a la salud y al medio ambiente sano, se implementan medidas dirigidas a reducir las emisiones contaminantes de fuentes móviles y se dictan otras disposiciones"*. Tiene como objetivo promover la transición hacia una movilidad sostenible mediante el impulso del uso de vehículos eléctricos y la implementación de infraestructura de carga adecuada. Establece medidas fiscales y un marco normativo para regular la producción, comercialización y uso de vehículos eléctricos, contribuyendo a la reducción de emisiones de GEI y a la disminución de la dependencia de combustibles fósiles.

En su artículo cuarto, establece que, desde el 1 de enero de 2023, las fuentes móviles terrestres con motor diésel que se fabriquen, ensamblen o importen al país deberán cumplir con los límites de emisión de tecnologías Euro VI o superiores. En el artículo quinto se establece que los vehículos diésel que no cumplan con estos estándares solo podrán circular hasta el 31 de diciembre de 2034 (Congreso de la República de Colombia, 2019).

Ley 2099 de 2021: Tiene como objetivo principal impulsar el desarrollo sostenible de Colombia mediante la transición hacia una matriz energética más limpia y baja en carbono. La Ley promueve el uso de fuentes de energía renovables no convencionales (ERNC), mejora la eficiencia energética y fomenta el uso de tecnologías limpias en varios sectores, incluido el transporte. En particular, facilita la transición hacia un sistema de transporte más limpio mediante la adopción de vehículos eléctricos y otras tecnologías de bajas emisiones, estableciendo incentivos fiscales y beneficios para promover la electrificación del transporte y el uso de combustibles más sostenibles. Además, la Ley establece exenciones para la contribución de solidaridad y redistribución de ingresos aplicables a estaciones de carga pública, reglamentada posteriormente a través de la Resolución 40362 de 2021 del Ministerio de Minas y Energía (Congreso de la República de Colombia, 2021).

Ley 2169 de 2021: Conocida como la Ley de Cambio Climático, establece un marco legal integral para abordar el cambio climático en Colombia, con un enfoque en la reducción de emisiones de GEI, la transición energética hacia fuentes limpias, la adaptación al cambio climático y el impulso a la sostenibilidad en diversos sectores clave del país. También establece un fondo para el avance tecnológico del transporte, específicamente atendiendo a los sistemas de movilidad de cero y bajas emisiones, así como al transporte de carga liviana.

Ley 2294 de 2023: Establece la creación del fondo para la promoción de ascenso tecnológico que incluye vehículos de carga livianos, pesados y volquetas, así como la infraestructura de recarga, cuyas subcuentas se encuentran en estructuración y operativización actualmente (DNP, 2023).

Resolución 40177 de 2020: *“Por la cual se definen las fuentes de energía de bajas o cero emisiones con base principalmente en su contenido de componentes nocivos para la salud y el ambiente, y se dictan otras disposiciones”.* Tiene como objetivo regular y promover el uso de vehículos eléctricos en Colombia, asegurando que cumplan con los estándares técnicos y de seguridad necesarios, y facilitando su incorporación al mercado y su operación dentro de un marco de sostenibilidad y eficiencia energética (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2020).

Resolución 40223 de 2021: *“Por la cual se establecen las condiciones mínimas de normalización y mercado para la implementación de infraestructura de carga para vehículos eléctricos e híbridos enchufables”.* Esta normativa define los estándares técnicos para garantizar la interoperabilidad, seguridad y eficiencia de las estaciones de carga. Específicamente, en su Artículo 4, establece los conectores requeridos para la carga, especificando el Tipo 1 (SAE J1772) para carga lenta en corriente alterna (CA) y el CCS Combo 1 para carga rápida (Ministerio de Minas y Energía, 2021).

Resolución 40362 de 2021: Establece las condiciones bajo las cuales se otorgan incentivos fiscales a las estaciones de carga, promoviendo así el desarrollo de la infraestructura necesaria para la adopción de vehículos eléctricos en el país.

Pese a los anteriores esfuerzos, a marzo de 2024, los principales corredores viales y nodos logísticos aún no cuentan con una oferta adecuada en términos de cantidad y disponibilidad de estaciones de carga para electricidad u otros energéticos de cero emisiones (Gil, 2024) . Esta ausencia dificulta la

adopción de camiones eléctricos, hidrógeno u otras tecnologías que lleguen a desarrollarse a escala comercial, para distancias mayores a 350 kilómetros⁴⁰.

En este contexto, persisten desafíos clave, como la necesidad de inversiones sustanciales en infraestructura, la coordinación efectiva entre los actores involucrados y la adaptación de la normativa vigente para facilitar la transición hacia vehículos eléctricos en el sector de carga. Además, el Departamento Nacional de Planeación (DNP) identificó que las estaciones de carga públicas en Colombia están concentradas principalmente en Antioquia y Bogotá (DNP, 2022), lo que resalta que la electrificación del transporte aún tiene desafíos en los entornos urbanos y es pertinente atenderlos antes de poder avanzar a su despliegue en carreteras nacionales.

Resolución 40123 de 2024. Establece los requisitos para la interoperabilidad y accesibilidad de las estaciones de carga pública para vehículos eléctricos e híbridos enchufables en Colombia. Esta normativa aplica a todos los operadores, prestadores de servicios y partes interesadas en el ámbito del transporte eléctrico. A partir del 1 de julio de 2024, todas las estaciones de carga pública deben estar registradas y operar bajo los protocolos definidos, como el OCPP. La resolución exige que las estaciones ofrezcan acceso sin suscripción, precios transparentes y canales de comunicación claros para los usuarios (Ministerio de Minas y Energía, 2024).

Además, establece que los operadores deben habilitarse antes de comenzar a prestar el servicio y cumplir con los requisitos de documentación establecidos, los cuales deben ser reportados a través de la plataforma nacional correspondiente, en conformidad con lo dispuesto por la Resolución 40223 de 2021.

8.3. Chile

Chile ha experimentado un notable incremento en la adopción de vehículos eléctricos. En 2024, las ventas de automóviles eléctricos aumentaron un 183% en comparación con el año anterior, alcanzando 4,500 unidades vendidas, lo que representó un 6.2% del total de autos vendidos en el país (El País, 2025). Este crecimiento ha estado acompañado por un fortalecimiento de la infraestructura de carga, con más de 3,000 puntos instalados a nivel nacional, un tercio de los cuales fueron habilitados solo en 2024 (El País, 2025).

En cuanto al segmento de vehículos pesados, la adopción aún se encuentra en una etapa inicial, aunque con señales claras de aceleración. En 2023, la penetración de ventas de camiones eléctricos fue de 1.56 %, comparado con el 0.41 % en 2022 y apenas 0.12 % en 2021 (Mobility Portal Latam, 2023). Para 2024, se presentaron cifras récord de ventas de camiones eléctricos, con un total de 121 camiones, el segmento tuvo un incremento de 236.11 % respecto al año anterior (Giro Limpio, 2025).

Un hito relevante en 2025 fue la implementación de la flota de camiones eléctricos de mayor tamaño en Latinoamérica, compuesta por 50 unidades de alto tonelaje Foton eAuman 2554, operadas por Sotraser en conjunto con Walmart Chile, Andes Motor y Copec Voltex. Esta flota es capaz de transportar hasta 45 toneladas con una autonomía de 250 km, y opera desde un electroterminal de 1,200 kW, alimentado por energía limpia en su totalidad. La instalación cuenta con 20 estaciones de carga rápida, lo que la posiciona como la más grande de Latinoamérica hasta la fecha (Mobility Portal Latam, 2024). Este proyecto, que involucró una inversión de 11 millones de dólares, se enmarca dentro de la Estrategia Nacional de Electromovilidad, que busca avanzar hacia la carbono neutralidad del país.

⁴⁰ Distancia promedio de viajes de transporte público de carga de acuerdo con los análisis del dashboard Proyecto Giro Zero <https://girozero.uniandes.edu.co/herramientas/dashboard> entre 2019 y 2023.

En cuanto al transporte público, Santiago destaca con 2,500 autobuses eléctricos en operación, consolidándose como una de las ciudades fuera de China con mayor número de estos vehículos. Se proyecta que la flota de autobuses eléctricos en la capital chilena supere las 4,000 unidades para 2026 (El País, 2025).

Chile cuenta con un conjunto de normativas vigentes en el ámbito de la electromovilidad que regulan tanto a los vehículos como a los sistemas de carga. El Ministerio de Energía, a través de la Superintendencia de Electricidad y Combustibles (SEC), define la regulación para la instalación de cargadores de uso público y privado, asegurando la seguridad y eficiencia de la infraestructura de recarga (Ministerio de Energía).

Adicional a esto, el país también cuenta con una plataforma de electromovilidad, la cual surge de una iniciativa del Ministerio de Energía con el fin de promover el uso de vehículos eléctricos (Ministerio de Energía). En esta plataforma se encuentran herramientas como Catálogos de Vehículos Eléctricos, Evaluador de Proyectos de Electromovilidad, Consejos para la conducción, Información sobre mantenimiento de vehículos eléctricos y otros recursos importantes en temas relevantes como la interoperabilidad, los sistemas de carga y recomendaciones generales para el despliegue de sistemas de carga.

a. Estrategia Nacional de Electromovilidad en Chile (2021)

En el 2017 se analizó el estado y características del sector transporte en Chile, con foco en las oportunidades que presenta su electrificación. Con ello y luego de un proceso participativo, se desarrolló la primera Estrategia Nacional de Electromovilidad donde se establecieron metas de largo plazo: alcanzar el 40% de vehículos particulares y 100% del transporte público urbano eléctricos al 2050 (Ministerio de energía de Chile, 2021).

La Estrategia Nacional de Electromovilidad impulsada por el Ministerio de Energía es una política de estado que busca elaborar una hoja de ruta para avanzar hacia el desarrollo del transporte sostenible. En esta, se propone atender los nuevos desafíos que apuntan a impulsar vehículos más eficientes y amigables con el medio ambiente, con tal de generar los lineamientos necesarios para el desarrollo seguro y sostenible de la movilidad eléctrica (Ministerio de energía de Chile, 2021). Por último, contar con metas y ambiciones que están establecidas a través de estrategias nacionales, hojas de ruta y acuerdos nacionales e internacionales que buscan acelerar la adopción de la movilidad eléctrica en el país.

Compromisos y Objetivos

Chile ha establecido metas ambiciosas en materia de electromovilidad como parte de su compromiso con la neutralidad del carbono al 2050. Según la Estrategia Nacional de Electromovilidad (2021), el país busca que:

- 100% de las nuevas incorporaciones al transporte público urbano sean vehículos cero emisiones para 2035.
- 100% de las ventas de vehículos livianos y medianos sean cero emisiones para 2035.
- 100% de las ventas de camiones y buses interurbanos sean cero emisiones para 2045.
- 100% de la maquinaria minera, forestal, de construcción y agrícola de más de 560 kW sea cero emisiones para 2035, y la de más de 19 kW para 2040⁴¹.

⁴¹ Se puede consultar en:

[https://energia.gob.cl/electromovilidad/img/Acuerdo%20Pu%CC%81blico%20Privado%20Electromovilidad%202022_1%20\(1\).pdf](https://energia.gob.cl/electromovilidad/img/Acuerdo%20Pu%CC%81blico%20Privado%20Electromovilidad%202022_1%20(1).pdf)

Estas metas buscan acelerar la adopción de tecnologías limpias y reducir las emisiones del sector transporte, responsable del 25.5% de las emisiones de GEI del país (Ministerio de energía de Chile, 2021).

Ejes fundamentales de la Estrategia Nacional de Electromovilidad

La estrategia se basa en cuatro ejes fundamentales, con 13 lineamientos y un plan de acción con 54 medidas a desarrollar en un período de 4-5 años.

1. Medios de transporte sustentable y financiamiento

Este eje busca acelerar la adopción de vehículos eléctricos en todos los segmentos del transporte, incluyendo el transporte público, la movilidad urbana, el transporte de carga y la maquinaria pesada. También se centra en desarrollar esquemas de financiamiento e incentivos que faciliten la transición tecnológica.

Principales medidas

- Electrificación del transporte público: Chile ha sido pionero en la incorporación de autobuses eléctricos en América Latina. La meta es que el 100% de las nuevas adquisiciones de autobuses urbanos sean eléctricos para 2035. En Santiago, el sistema RED ya cuenta con más de 800 autobuses eléctricos, consolidándose como la segunda flota más grande fuera de China.
- Expansión de flotas eléctricas en taxis y vehículos comerciales: El programa "Mi Taxi Eléctrico" busca sustituir taxis convencionales por eléctricos mediante subsidios e incentivos financieros.
- Incentivos para el transporte de carga eléctrica: A través del programa "Giro Limpio", se apoya la adopción de camiones eléctricos en flotas comerciales y logísticas.
- Electrificación de maquinaria pesada: Se establecen metas para la electrificación de equipos en sectores estratégicos como minería, construcción y agricultura. Para 2035, se espera que el 100% de la maquinaria de más de 560 kW sea cero emisiones.

Impacto esperado

- Reducción de emisiones en el sector transporte, responsable del 25.5% de los GEI en Chile.
- Ahorro en costos operativos para transportistas y empresas, debido a la mayor eficiencia de los vehículos eléctricos.
- Mejora de la calidad del aire en zonas urbanas con alta congestión vehicular.

2. Infraestructura de carga y regulación

Este eje aborda la expansión de la red de carga pública y privada, el desarrollo de una regulación adecuada y la definición de estándares para garantizar la interoperabilidad de la infraestructura.

Principales medidas

- Expansión de la red de carga pública: Chile ha experimentado un crecimiento exponencial en infraestructura de recarga pasando de contar con 70 cargadores en 2017 a más de 818 cargadores en 2021. A finales de 2024, el país ya contaba con más de 1,480 conectores de recarga pública.
- Desarrollo de electroterminales para transporte público: En Santiago operan varios electroterminales diseñados para abastecer la creciente flota de autobuses eléctricos del sistema RED.

- Regulación y certificación de cargadores: Se han implementado normativas como el Pliego Técnico Normativo N°15, que establece requisitos de seguridad para la instalación de estaciones de carga.
- Tarifas diferenciadas para la carga de vehículos eléctricos: La Superintendencia de Electricidad y Combustibles (SEC) ha avanzado en la regulación de precios para que los usuarios de vehículos eléctricos puedan acceder a tarifas más competitivas en horarios de menor demanda.

Impacto esperado

- Mayor acceso a puntos de carga para usuarios de vehículos eléctricos.
- Creación de un ecosistema de carga seguro y estandarizado, garantizando interoperabilidad entre diferentes marcas de vehículos.
- Reducción de barreras para la adopción masiva de electromovilidad.

3. Investigación y capital humano

Este eje se enfoca en fortalecer las capacidades técnicas del país, impulsar la innovación en electromovilidad y desarrollar talento especializado para acompañar la transición.

Principales medidas

- Programas de formación técnica y profesional: Se busca capacitar a mecánicos, técnicos e ingenieros en electromovilidad a través de programas específicos en centros de educación superior y técnica.
- Investigación aplicada en nuevas tecnologías: A través de fondos públicos y asociaciones con el sector privado, se promueve el desarrollo de baterías, infraestructura de carga y software de gestión para flotas eléctricas.
- Fomento a la fabricación y ensamblaje local: Se están explorando oportunidades para establecer centros de producción de componentes eléctricos en Chile, aprovechando su liderazgo en la extracción de litio, un material clave en la fabricación de baterías.

Impacto esperado

- Creación de empleos especializados en el sector de electromovilidad.
- Desarrollo de capacidades nacionales para la producción y mantenimiento de tecnologías limpias.
- Generación de conocimiento que impulse la innovación y la competitividad en el sector.

4. Difusión, información y articulación

Este eje busca fortalecer la coordinación entre los diferentes actores involucrados en la transición a la electromovilidad, además de garantizar que la ciudadanía tenga acceso a información clara sobre los beneficios y oportunidades de esta tecnología.

Principales medidas

- Coordinación entre el sector público y privado: Se han creado mesas de trabajo entre ministerios, empresas de transporte y proveedores de energía para asegurar una implementación eficiente de la estrategia.
- Difusión y campañas de educación ciudadana: Se realizan actividades para informar a la población sobre los beneficios ambientales y económicos de los vehículos eléctricos.

- Fomento de la cooperación internacional: Chile participa en alianzas con países líderes en electromovilidad para compartir experiencias y mejores prácticas.

Impacto esperado

- Mayor conocimiento y confianza por parte de la ciudadanía sobre la tecnología de vehículos eléctricos.
- Reducción de la resistencia al cambio en sectores tradicionalmente dependientes de combustibles fósiles.
- Aceleración de la implementación de la estrategia mediante cooperación y coordinación entre sectores.

b. Incentivos y Programas de Adopción

- **Mi Taxi Eléctrico:** Programa que apoya la conversión de taxis a vehículos eléctricos.
- **Aceleradora de Electromovilidad:** Iniciativa para fomentar la electromovilidad en empresas mediante financiamiento y asesoría técnica.
- **Giro Limpio:** Programa de certificación para transportistas que adoptan tecnologías más limpias.

c. Regulaciones Clave

Ley Marco de cambio climático (Ley 21455). Promulgada en junio de 2022, la Ley 21455 establece el marco legal para la acción climática en Chile, con el objetivo de alcanzar la neutralidad de emisiones de gases de efecto invernadero al año 2050 (Congreso Nacional de Chile, 2022).

Ley de Eficiencia Energética (Ley 21305). Tiene como objetivo promover el uso eficiente de la energía en distintos sectores de la economía para reducir el consumo energético y las emisiones de GEI, contribuyendo así a la meta de neutralidad del carbono para 2050. Asimismo, establece estándares de eficiencia energética para vehículos livianos y medianos y obliga a que los fabricantes y comercializadores informen el rendimiento energético de estos vehículos, con el fin de que los consumidores puedan tomar decisiones informadas (Congreso Nacional de Chile, 2021).

Reglamento de Interoperabilidad (Ministerio de Energía): En el artículo 6 de la Ley de Eficiencia Energética se mandata al Ministerio de Energía a velar por la interoperabilidad de los cargadores de vehículos eléctricos con el fin de facilitar el acceso y conexión de los usuarios de vehículos eléctricos a la red de carga (Ministerio de Energía). Actualmente se encuentra en desarrollo.

En cuanto al segmento de HDEV, se podría decir que Chile es quien lleva la delantera a nivel regional. A parte de los pilotos que se han realizado a pequeña escala, en marzo de 2025, el Centro de Movilidad Sostenible (CMS) firmó un convenio con la empresa Sotraser para estudiar la implementación de flotas de camiones eléctricos en Santiago y otras regiones del país (InduAmbiente, 2025).

Según los informes publicados, Sotraser, ha incorporado 50 camiones eléctricos a su flota, consolidándose como la mayor de la región. Esta inversión incluye 40 camiones Foton eAuman 2554, en colaboración con Andes Motor y Walmart Chile, y 10 camiones Volvo FH y FM Electric (Heufemann, 2025). Además, ha inaugurado un electroterminal con 20 puntos de carga rápida. Los camiones tienen una autonomía de hasta 250 km por carga y capacidad de carga de 45 toneladas. Sotraser también ha formado a sus conductores y equipos técnicos, y participa en el programa Giro Limpio desde 2019, con el objetivo de reducir sus emisiones y promover una logística sostenible (Heufemann, 2025).

8.4. Costa Rica

Costa Rica se ha consolidado como un referente en movilidad eléctrica en América Latina, con un fuerte compromiso hacia la descarbonización del sector transporte, alineado con su Plan Nacional de Descarbonización (2019-2050). Alrededor del 2020, Costa Rica se posicionaba como líder en la región al ser el primer país de América Central y el Caribe en contar con una Red Nacional de Carga para vehículos eléctricos, con más de 100 puntos de carga distribuidos a lo largo del territorio nacional (Gobierno del Bicentenario, 2020).

Aunque la infraestructura de carga está en constante crecimiento, la adopción de HDEV es limitada. La mayoría de los esfuerzos se han centrado en vehículos livianos y en la electrificación del transporte público. Por ello, a diferencia de contextos como el de Colombia y Chile, Costa Rica no cuenta con una Estrategia Nacional de Movilidad Eléctrica, pero sí con un Plan Nacional de Transporte Eléctrico.

a. Plan Nacional de Transporte Eléctrico (PNTE) 2018-2030

El Plan Nacional de Transporte Eléctrico (PNTE) es una iniciativa estratégica que busca transformar el sector transporte mediante la electrificación de la flota vehicular en todas sus modalidades, incluyendo bicicletas, motocicletas, automóviles, taxis, autobuses, transporte de carga y trenes. El objetivo principal es promover una mayor participación de las energías renovables en la matriz energética nacional, mejorar la calidad del aire en zonas urbanas y reducir las emisiones de GEI, contribuyendo así a las políticas de descarbonización del país (Ministerio de Ambiente y Energía de Costa Rica, 2019).

Objetivos principales del PNTE

- **Electrificación del transporte público y privado:** Implementar programas que faciliten la transición hacia vehículos eléctricos en el transporte público y privado, incluyendo incentivos para la adquisición de estos vehículos y el desarrollo de infraestructura de carga adecuada.
- **Desarrollo de infraestructura:** Establecer una red nacional de estaciones de carga eléctrica que soporte la creciente flota de vehículos eléctricos, garantizando su operatividad y accesibilidad en todo el territorio nacional.
- **Fortalecimiento del marco regulatorio:** Actualizar y crear normativas que promuevan la adopción de tecnologías limpias en el sector transporte, garantizando la seguridad, eficiencia y sostenibilidad de las soluciones implementadas.

Metas específicas del PNTE

- **Transporte público:** Para 2035, se espera que el 30% de la flota de transporte público sea de cero emisiones y que el Tren Eléctrico de Pasajeros opere con un 100% de electricidad. Para 2050, se proyecta que el 85% de la flota de transporte público sea de cero emisiones y que el sistema de transporte público opere de manera integrada, sustituyendo al automóvil particular como la primera opción de movilidad en la Gran Área Metropolitana (GAM).
- **Vehículos privados:** Se proyecta que para 2035, un 30% de la flota de vehículos ligeros privados e institucionales sea eléctrica, y para 2050, el 95% de la flota sea de cero emisiones. Además, hacia 2025, se espera estabilizar el crecimiento de la flota de motocicletas y adaptar estándares para migrar hacia una flota de cero emisiones.

Relación con otras iniciativas

El PNTE se enmarca dentro de las políticas energéticas contenidas en el VII Plan Nacional de Energía (PNE) y está alineado con el Plan Nacional de Descarbonización, que establece acciones específicas para reducir las emisiones en el sector transporte y promover el uso de energías limpias.

Entre las acciones ya implementadas se encuentran proyectos piloto de autobuses eléctricos, la inclusión de metas de tecnologías cero emisiones en los contratos de concesión de transporte público y el desarrollo de una hoja de ruta para la consolidación de un clúster de hidrógeno (Ministerio de Ambiente y Energía de Costa Rica, 2019).

b. Leyes relevantes

Ley N° 9518, conocida como la "Ley de Incentivos y Promoción para el Transporte Eléctrico", tiene como objetivo establecer un marco normativo que promueva el uso del transporte eléctrico en Costa Rica, fortaleciendo las políticas públicas dirigidas a incentivar su adopción tanto en el sector público como entre la ciudadanía en general (Asamblea Legislativa de la República de Costa Rica, 2017).

Entre los principales incentivos que ofrece esta Ley se encuentran:

- **Exoneraciones fiscales:** Los vehículos eléctricos nuevos con un valor CIF (Costo, Seguro y Flete, por sus siglas en inglés) menor o igual a \$30,000 USD están exentos de todos los impuestos de importación, lo que reduce significativamente su costo final. Para vehículos con valores superiores, las exoneraciones varían según el monto⁴².
- **Beneficios no económicos:** Los vehículos eléctricos están exentos de la restricción vehicular en el área metropolitana, permitiendo una mayor flexibilidad en su uso diario.

Adicionalmente, la Ley establece como prioridad nacional la utilización de energía eléctrica renovable en el transporte público, incluyendo modalidades como ferrocarriles, trenes, autobuses y taxis, con el fin de reducir las emisiones contaminantes y avanzar hacia la descarbonización de la economía.

Para implementar y regular estos incentivos, se promulgó el "Reglamento de Incentivos para el Transporte Eléctrico" mediante el **Decreto N° 41092-MINAE-H-MOPT**, que detalla las disposiciones y procedimientos necesarios para la aplicación efectiva de la Ley (Poder ejecutivo de Costa Rica, 2018).

c. Plan Nacional de Descarbonización

Lanzado en febrero de 2019, es una estrategia integral que busca transformar la economía del país hacia un modelo sostenible y libre de emisiones netas de carbono para el año 2050. Este plan se alinea con los compromisos internacionales asumidos en el Acuerdo de París y refleja el liderazgo de Costa Rica en materia ambiental (Ministerio de Ambiente y Energía, 2019).

El plan se estructura en diez ejes de acción, agrupados en tres áreas principales:

1. Transporte y Movilidad Sostenible

- **Eje 1:** Desarrollo de un sistema de movilidad basado en transporte público seguro, eficiente y renovable, y en esquemas de movilidad activa y compartida.

⁴² Se puede consultar en:

<https://faolex.fao.org/docs/pdf/cos177932.pdf>

- **Eje 2:** Transformación de la flota de vehículos ligeros hacia tecnologías de cero emisiones, utilizando energía renovable no proveniente de fuentes fósiles.
- **Eje 3:** Fomento de un sistema de transporte de carga que adopte modalidades, tecnologías y fuentes de energía capaces de reducir progresivamente sus emisiones hasta alcanzar niveles cercanos a cero.

2. Energía, Industria, Construcción y Gestión de Residuos

- **Eje 4:** Consolidación del sistema eléctrico nacional con la capacidad, flexibilidad, inteligencia y resiliencia necesarias para abastecer y gestionar energía renovable a costos competitivos.
- **Eje 5:** Desarrollo de edificaciones de distintos usos (residencial, comercial, institucional) bajo estándares de alta eficiencia energética y procesos constructivos de bajas emisiones.
- **Eje 6:** Modernización del sector industrial mediante la adopción de procesos y tecnologías eléctricas, eficientes y sostenibles, con bajas o cero emisiones.
- **Eje 7:** Desarrollo de un sistema de gestión integrada de residuos, enfocado en la separación, reutilización, revalorización y disposición final con máxima eficiencia y mínimas emisiones de gases de efecto invernadero.

3. Agricultura, Uso de Suelo y Soluciones Basadas en la Naturaleza

- **Eje 8:** Fomento de sistemas agroalimentarios altamente eficientes que generen bienes para el consumo local y la exportación con una baja huella de carbono.
- **Eje 9:** Consolidación de un modelo ganadero eco-competitivo, centrado en la eficiencia productiva y en la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero.
- **Eje 10:** Consolidación de un modelo de gestión territorial (rural, urbano y costero) que promueva la protección de la biodiversidad, el aumento y mantenimiento de la cobertura forestal, así como los servicios ecosistémicos, mediante soluciones basadas en la naturaleza.

El plan establece acciones específicas a corto, mediano y largo plazo, con metas claras para cada uno de los ejes mencionados. Además, promueve la participación activa de diversos sectores de la sociedad, incluyendo el sector público, privado y la ciudadanía en general, reconociendo que la descarbonización es un esfuerzo colectivo (Ministerio de Ambiente y Energía , 2019).

8.5. Obstáculos comunes en Latinoamérica

A partir del análisis de los contextos en América Latina, se pueden identificar tendencias y factores comunes en los modelos de adopción, así como en las barreras y desafíos asociados con la transición hacia la electrificación del transporte de carga. Países como Colombia y Chile ya han implementado resoluciones y normativas orientadas a promover la interoperabilidad, no solo en términos de infraestructura, sino también mediante el establecimiento de protocolos abiertos.

Al igual que en los casos de estudio de la Unión Europea y Estados Unidos, la principal barrera para la adopción en estos contextos sigue siendo el despliegue de la infraestructura de carga, junto con las subvenciones necesarias para su implementación. Como era de esperarse, también resulta fundamental la implementación de un paquete de incentivos fiscales para la adquisición de vehículos eléctricos (VE), con el fin de hacer los costos de compra más competitivos en comparación con los de los vehículos con motor de combustión interna (VMCI).

Por ello, la adopción de flotas eléctricas no se reduce únicamente a la adquisición de nuevos vehículos; implica una transformación profunda en la operación, la infraestructura de carga y la planificación financiera. Para comprender mejor los desafíos involucrados, es útil analizar esta transición desde dos enfoques clave propuestos por Jorge A. Suárez⁴³ en uno de sus artículos de opinión. El primero es el modelo de las Cinco Fuerzas de Porter, que explica cómo la estructura del mercado influye en la adopción de nuevas tecnologías, y el segundo es el Modelo de Adopción de Tecnología (Technology Adoption Model, TAM), que ayuda a entender qué factores determinan la percepción de utilidad y facilidad de uso de una innovación (Latam Mobility, 2025).

El costo de transición: Un desafío estratégico

Desde una perspectiva estratégica, uno de los mayores desafíos identificados por Porter es el Costo de Cambio (*Switch Cost*). Para una empresa que opera con camiones diésel, la transición a una flota eléctrica no solo representa una inversión en nuevos vehículos, sino también en infraestructura de carga, capacitación de personal, ajustes operativos y, en muchos casos, la gestión de incertidumbres regulatorias. Cuanto más consolidado esté el modelo de operación tradicional dentro de una empresa y mayor sea su flota, mayor será la resistencia a este cambio. Este fenómeno ha sido constatado en múltiples conversaciones con actores clave del sector. Sin embargo, este costo de cambio no es inmutable. Con el tiempo, el aumento en la disponibilidad de información y la evidencia sobre la reducción en costos operativos harán que la electrificación sea una opción más viable. A medida que se desarrollen centros de distribución electrificados, los costos de los vehículos eléctricos continúen disminuyendo y las regulaciones impulsen su adopción, las empresas enfrentarán menos barreras. Además, dentro de las propias organizaciones, el consenso sobre los beneficios de la movilidad eléctrica crecerá, facilitando la toma de decisiones. Las compañías que apuesten temprano por esta transformación podrán distribuir mejor sus inversiones y aprovechar incentivos fiscales antes que sus competidores.

Percepción de viabilidad y barreras operativas: El enfoque táctico

Desde una perspectiva más operativa, el TAM destaca dos factores esenciales en la adopción de vehículos eléctricos dentro de flotas comerciales: la percepción de utilidad y la facilidad de integración. Es decir, estos vehículos no solo deben demostrar ser una opción económicamente viable, sino también adaptarse sin dificultades a la dinámica diaria de las empresas. En términos de rentabilidad, los vehículos eléctricos ya ofrecen costos operativos y de mantenimiento más bajos. Sin embargo, su competitividad aún depende de variables como el precio de adquisición, la infraestructura de carga y el kilometraje requerido para maximizar el retorno de inversión. Un factor clave a considerar es el impacto de nuevas normativas, como la Euro 6, que podrían encarecer los camiones diésel y reducir la brecha de costos entre ambas tecnologías. Por otro lado, la facilidad de adopción sigue siendo un reto. La oferta de modelos eléctricos aún es limitada en algunos segmentos, la infraestructura de carga requiere inversiones considerables y el acceso a financiamiento puede ser complejo. Muchas empresas perciben la transición como un proceso costoso y difícil, lo que retrasa la toma de decisiones. A pesar de estos obstáculos, la evolución tecnológica está allanando el camino. La mejora en la autonomía de las baterías y la entrada de nuevos fabricantes están ampliando la oferta y reduciendo costos, haciendo que los vehículos eléctricos sean una alternativa cada vez más viable para distintos tipos de flotas. Con el tiempo, estos avances facilitarán la adopción y acelerarán la transición hacia una movilidad más sostenible.

⁴³ Fundador de EVRY Energy.

8.6. Puntos comunes y su aplicación en la RCF

En general, los requisitos de la industria de carga de vehículos eléctricos que existen a nivel mundial están orientados a simplificar el proceso de carga para los conductores, así como a hacer un uso eficiente de la energía.

Como se observó en los casos de estudio, además de la legislación específica de cada país, los gobiernos suelen seguir las directrices establecidas por la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC), adaptando las regulaciones a las particularidades de sus respectivos marcos nacionales. Una de las normas más influyentes en el ámbito de la electromovilidad es la IEC 61851 (Schwarz Simão, 2025), que aborda aspectos clave como la instalación de estaciones de carga, la seguridad del sistema, la comunicación digital entre el equipo de suministro de energía y el vehículo eléctrico, así como la estandarización de conectores y los requisitos técnicos para su fabricación y mantenimiento. Asimismo, existen estándares universales, como la ISO 15118, que regula la comunicación digital entre vehículos eléctricos y estaciones de carga.

En relación con los programas de despliegue de infraestructura de carga, tanto NEVI como AFIR proponen directrices relevantes sobre las potencias mínimas requeridas y las proyecciones de adaptación con un horizonte hasta 2030 y 2050. Para evaluar la aplicabilidad de estas directrices en el contexto mexicano, sería útil realizar un ejercicio comparativo que adapte los principales lineamientos de estos programas, especialmente en lo que respecta a los requisitos de infraestructura, a la RCF.

Teniendo mapeada la red de ejes de transporte actual (ver Figura 28) se podría obtener un estimado del número de cargadores necesarios bajo el marco de NEVI y AFIR.



Figura 28. Red de ejes de transporte en territorio mexicano. Fuente: DGST (2023)

La Dirección General de Servicios Técnicos (DGST), identifica 15 Ejes de Transporte (ET) a lo largo y ancho de México (DGST, 2023). La Tabla 15 muestra los nombres de estos ET junto a sus longitudes respectivas.

Tabla 15. Red de ejes de transporte en territorio mexicano.

| No. | Nombre | Longitud (Km) | TDPA (pesados) |
|--------------|---|------------------|----------------|
| ET1 | Transpeninsular de Baja California | 1,757.8 | 797 |
| ET2 | México – Nogales con ramal a Tijuana | 2,886.37 | 3,896 |
| ET3 | Querétaro – Ciudad Juárez | 1,792.78 | 4,862 |
| ET4 | México – Nuevo Laredo con ramal a Piedras Negras | 1,684.18 | 10,972 |
| ET5 | Veracruz – Monterrey con ramal a Matamoros | 1,607.95 | 2,230 |
| ET6 | Puebla – Oaxaca – Cd. Hidalgo | 760.41 | 2,913 |
| ET7 | México - Puebla – Progreso | 1,366.422 | 6,432 |
| ET8 | Peninsular de Yucatán | 1,309.6 | 1,991 |
| ET9 | Mazatlán – Matamoros | 1,166.47 | 3,240 |
| ET10 | Manzanillo – Tampico con ramales a Lázaro Cárdenas y Ecuandureo | 1,498.340 | 4,751 |
| ET11 | Altiplano | 543.15 | 5,462 |
| ET12 | México –Tuxpan | 304.9 | 4,078 |
| ET13 | Acapulco – Veracruz | 698.85 | 5,423 |
| ET14 | Circuito Transístmico | 698.07 | 2,308 |
| ET15 | Costero Pacífico | 1,755.95 | 816 |
| TOTAL | | 19,841.22 | 60,171 |

Fuente: Elaborado a partir de DGST (2023)

Si se aplicaran los criterios establecidos en los programas NEVI y AFIR para el número de puntos de carga a los 15 corredores de la RCF (es decir, cada 80 km según NEVI y cada 60 km según AFIR), el total de puntos de carga necesarios en la RCF para un horizonte hipotético proyectado a 2040 sería de 255 puntos de carga bajo los estándares de NEVI, con al menos 4 conectores de corriente continua (DC) con una potencia mínima de 150 kW por conector (es decir, al menos 600 kW por punto de carga).

En contraste, bajo los lineamientos de AFIR, se requerirían 339 puntos de carga con una potencia individual mínima por conector de 350 kW. La representación gráfica del número de puntos de carga requeridos para cada ET de la Tabla 15, según ambos programas, se encuentran en la Figura 29.

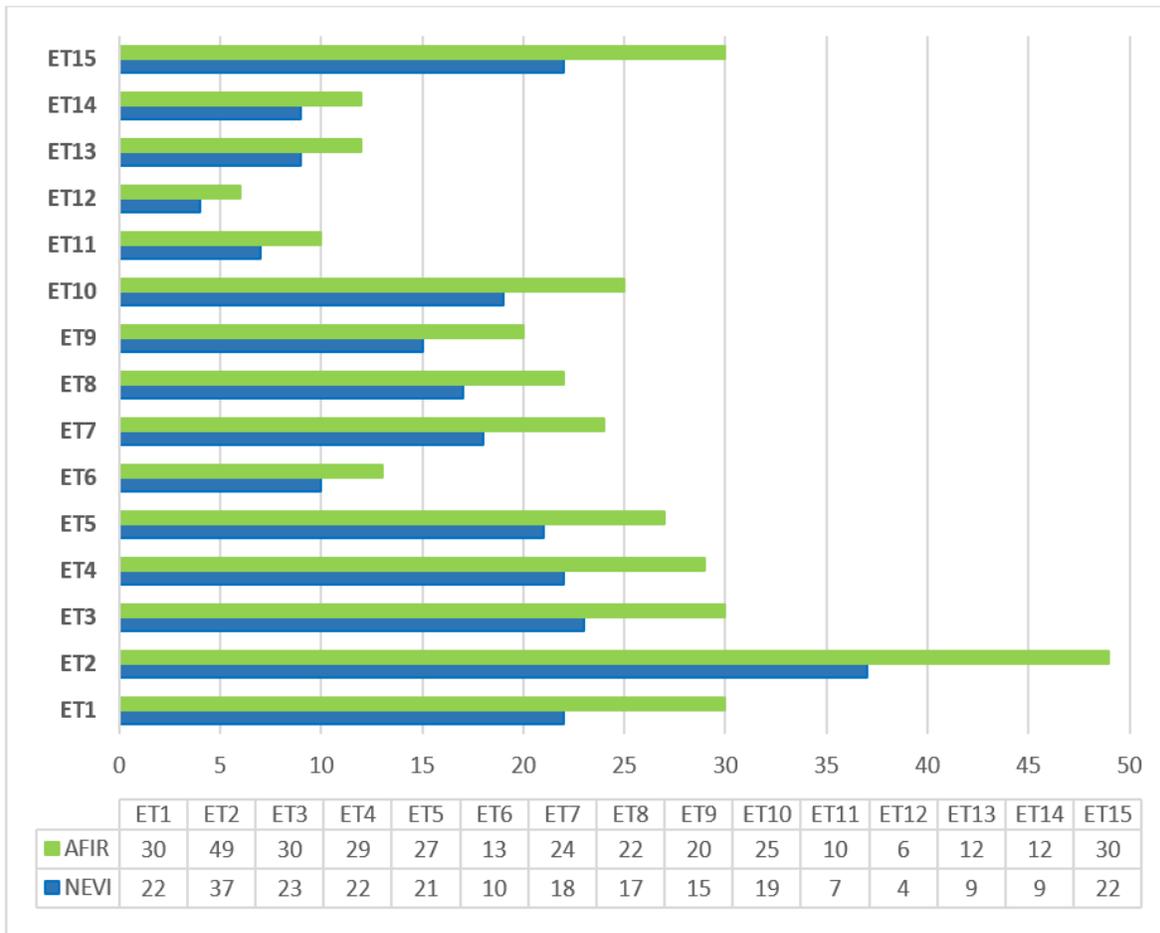


Figura 29. Puntos de carga requeridas para HDEV en la RCF según criterios de AFIR y NEVI. Fuente: Elaboración propia.

Considerando la demanda energética, bajo los lineamientos de NEVI sería necesario disponer de 153 MW para satisfacer las proyecciones a 2040. No obstante, antes de avanzar, es fundamental realizar una evaluación detallada de la capacidad de la red eléctrica nacional, tomando en cuenta la incorporación de energías renovables y el estado actual de red en cuanto a infraestructura para generación, transmisión y distribución.

9. Reflexiones finales, hallazgos y conclusiones preliminares

A partir de la investigación y el análisis de los casos de referencia, se pueden formular una serie de conclusiones para la toma de decisiones sobre el desarrollo de la infraestructura de carga de HDEV en México. Para ello, es importante tener en cuenta dos cosas antes de seguir con este apartado.

1. No todas las iniciativas para el desarrollo de la infraestructura de carga deben traducirse en regulaciones formales. Algunas áreas requieren intervenciones más flexibles o menos estructuradas, pero igualmente relevantes para fomentar el crecimiento del sector.
2. Aunque el enfoque principal es la infraestructura de carga para HDEV, algunas recomendaciones también abordan aspectos más amplios relacionados con la carga de vehículos eléctricos en general, contribuyendo así a la consolidación de una infraestructura interoperable en México.

9.1. Diferencias estructurales entre México y los casos internacionales

El análisis comparado con los casos de Estados Unidos, la Unión Europea y países seleccionados de América Latina revela que los desafíos estructurales del despliegue de infraestructura de carga para HDEV en México son sustancialmente distintos. En contextos como EE.UU. o Países Bajos, las soluciones tecnológicas son diseñadas, producidas y desplegadas localmente bajo marcos normativos sólidos y con capacidades industriales propias. Por el contrario, México opera bajo una lógica de adopción tecnológica, incorporando equipos y soluciones desarrolladas en otras regiones, principalmente de origen chino, europeo, japonés o estadounidense.

Este carácter importador de tecnología impone barreras particulares. Primero, limita la capacidad para influir en el diseño de estándares técnicos. Segundo, dificulta la alineación entre los marcos regulatorios nacionales y las especificaciones de los equipos disponibles en el mercado. Tercero, genera un ecosistema de carga fragmentado, donde conviven múltiples tecnologías con distintos niveles de compatibilidad.

Además, la madurez institucional y el grado de coordinación entre actores en México difiere del observado en los casos de referencia. Mientras que en California y Países Bajos se identifican entidades rectoras con atribuciones claras y procesos definidos para la implementación, en México aún no se consolida un ente coordinador ni una estrategia nacional operativa.

Otro aspecto distintivo es el tipo de uso esperado para los HDEV. En México, muchas rutas de transporte pesado cruzan zonas con baja densidad poblacional y limitada infraestructura energética, lo cual condiciona la estrategia de despliegue. Esto contrasta con corredores europeos de alta densidad y servicios integrados, donde la electrificación se puede planificar con mayores certezas.

Por estas razones, el diseño de la infraestructura de carga para HDEV en México no puede seguir una lógica de réplica directa. Se requieren estrategias adaptadas, capaces de dialogar con la diversidad tecnológica del mercado, responder a las limitaciones operativas de la red, y evolucionar junto con el desarrollo de capacidades nacionales en manufactura, regulación y operación.

En suma, más que copiar modelos, México debe construir un marco de referencia propio, que tome elementos de experiencias internacionales (como la interoperabilidad o la planificación por demanda) pero los adapte a las condiciones locales en términos de mercado, institucionalidad, territorio y capacidades técnicas.

9.2. Infraestructura: planificación, despliegue y prioridades

La planeación del despliegue de infraestructura de carga para vehículos eléctricos pesados (HDEV) debe responder a criterios técnicos, logísticos y estratégicos, priorizando corredores que permitan maximizar el impacto, reducir barreras operativas y generar aprendizajes aplicables a escala nacional. A diferencia de una expansión uniforme en todo el territorio, el enfoque escalonado, guiado por datos y demanda proyectada, permite una gestión más eficiente de recursos financieros, capacidades técnicas y coordinación institucional.

Uno de los puntos centrales identificados a partir del análisis internacional es la necesidad de articular la infraestructura con la lógica operativa de los transportistas, considerando el tipo de trayecto, la autonomía de los vehículos disponibles, y la ubicación de centros logísticos clave. En ese sentido, la experiencia del proyecto **Giro Zero** en Colombia resulta relevante. Este consiste en construir un modelo que permita priorizar los corredores según la disponibilidad de tecnología para vehículos eléctricos de mediano alcance y, posteriormente, para camiones de largo alcance. Las cinco etapas que lo componen se resumen en la Figura 30.



Figura 30. Modelo para la priorización de carga en corredores de Transporte Automotor de Carga. Fuente: Elaboración propia a partir de información de Giro Zero.

El adoptar ese modelo, permitiría priorizar las estaciones de carga en la RCF basada únicamente en la demanda, lo cual se deberá contrastar en un modelo posterior con la oferta.

Una vez definidos los corredores prioritarios, se debe designar un ente coordinador (a nivel estatal o nacional) para supervisar su desarrollo e implementación. Se podría adoptar un modelo similar al del programa NEVI de la FHWA en Estados Unidos o priorizar un despliegue progresivo de la infraestructura en función de la demanda. En cualquiera de los casos, se debe establecer un marco de control y seguimiento que permita evaluar el avance de la implementación en cada estado o corredor designado.

En el caso mexicano, este enfoque resulta pertinente dada la diversidad de rutas y condiciones regionales. Sin embargo, como se complementa con las percepciones recabadas en entrevistas a actores clave del ecosistema, también es importante incorporar una dimensión experimental en esta planificación. Diferentes actores, tanto públicos como privados, coincidieron en la necesidad de realizar proyectos piloto que no solo validen la utilidad y beneficios de los corredores electrificados, sino que permitan identificar barreras reales, técnicas, operativas, regulatorias o logísticas, antes de avanzar a una fase de despliegue más amplio.

En particular, se destacó la necesidad de focalizar pruebas piloto en corredores con alta relevancia internacional, como los que conectan centros industriales mexicanos con los estados de California y Texas, debido a los requisitos ambientales establecidos a nivel estatal. Esta proyección normativa podría exigir a los transportistas mexicanos operar con estándares de cero emisiones, por lo que estos corredores representan una oportunidad estratégica para ensayar soluciones viables. También

se mencionó con frecuencia el corredor que pasa por Querétaro y se dirige hacia el norte del país, como un trayecto prioritario donde sería factible iniciar despliegues pilotos, dado su relevancia logística y conectividad, pero que sin embargo debería realizarse un proceso que permita identificar de manera precisa el mejor corredor para realizar dichos pilotos.

Además de la demanda de carga, varios actores enfatizaron que la capacidad de la red eléctrica local y la posibilidad de conexión con CFE deben ser factores determinantes en la selección de corredores prioritarios. En ese sentido, el despliegue no debe iniciarse únicamente por donde transita más carga, sino donde existan condiciones técnicas mínimas para comenzar a ver beneficios tangibles, lo cual podría acelerar la aceptación del modelo y su replicabilidad.

La falta de lineamientos claros o una estrategia nacional de despliegue fue señalada por múltiples actores como una fuente de incertidumbre. En varios casos, se mencionó que la ausencia de una hoja de ruta nacional dificulta la coordinación interinstitucional, al no quedar claro qué autoridad debe definir los criterios técnicos, operativos o regulatorios. Esto complica la planeación desde lo local y frena decisiones clave como la asignación de recursos, la selección de ubicaciones o el otorgamiento de permisos.

La planeación debe considerar además factores complementarios como la disponibilidad de terrenos para estaciones de carga, y la existencia de centros de acopio o puntos logísticos donde los operadores ya realizan paradas técnicas. Estaciones de servicio existentes, patios de maniobra o zonas de descanso podrían reconvertirse, de forma parcial o total, para alojar infraestructura de carga, siempre que cumplan con criterios mínimos de accesibilidad, seguridad y maniobrabilidad.

Es importante también considerar que la construcción de la infraestructura de carga y reabastecimiento necesaria para respaldar una transición acelerada hacia vehículos medianos y pesados de cero emisiones (ZE-MHDV) requiere inversiones oportunas y un sólido apoyo normativo. A corto plazo, no es necesario contar con una red de infraestructura de carga completamente distribuida en todo el territorio. Para una gestión eficiente de los recursos, el despliegue de la infraestructura debe priorizarse en las áreas donde se espera una mayor demanda de energía, derivada del tráfico de MHDV (ICCT, 2023).

Finalmente, la planificación del despliegue debe integrar componentes de evaluación y monitoreo continuo, permitiendo ajustar estrategias en función de la evolución tecnológica, la respuesta de los usuarios y las condiciones del mercado energético. Este componente de aprendizaje es vital en contextos emergentes donde los niveles de incertidumbre aún son altos.

9.3. Diseño técnico y operativo de estaciones de carga

El diseño de las estaciones de carga para vehículos eléctricos pesados no puede limitarse a la instalación de equipos de alta potencia. Debe considerar una serie de elementos funcionales, espaciales, normativos y operativos que permitan su integración efectiva en los corredores logísticos y su uso seguro por parte de conductores y operadores.

Uno de los primeros aspectos es la selección del sitio. Las estaciones deben estar ubicadas en puntos estratégicos que permitan acceso seguro desde ambos sentidos de circulación, preferiblemente aprovechando infraestructura existente como estaciones de servicio, patios logísticos o zonas de descanso. Para que esto sea posible, el sitio debe cumplir con ciertos requisitos básicos como radio de giro suficiente para vehículos pesados, disponibilidad de espacio para maniobras, y facilidad de conexión a la red eléctrica.

Además, el diseño debe prever una futura expansión. Esto implica disponer de espacio y trazado para añadir nuevos cargadores, así como considerar los flujos de entrada y salida de vehículos para evitar cuellos de botella. Se recomienda que las estaciones combinen cargadores de distintas

potencias, permitiendo adaptarse tanto a paradas prolongadas como a recargas rápidas según el tipo de operación.

La experiencia europea muestra que la estandarización en el diseño de estaciones facilita la implementación, reduce costos, y mejora la experiencia del usuario. Por ello, se debe establecer un espacio de diálogo con todos los grupos de interés (*stakeholders*) relevantes para definir dicho diseño. Se recomienda seguir todas las recomendaciones listadas en la Tabla 13 y considerar aspectos como la optimización del espacio de estacionamiento, la facilidad de expansión, la combinación de carga rápida y lenta, y la accesibilidad para otros tipos de vehículos (Fraunhofer ISI, 2024).

Un punto crítico es la interoperabilidad. La incorporación de tecnologías como el estándar MCS (Megawatt Charging System) que se perfila como un componente clave para los vehículos de largo alcance muestra justamente que es un momento clave para avanzar en nuevos desarrollos y pruebas locales. Aunque su despliegue aún es incipiente, es importante anticipar su llegada evaluar su inclusión desde ahora en las potenciales estaciones a futuro. Además, se requiere acordar con los fabricantes las especificaciones técnicas del conector y su ubicación en los vehículos, para evitar errores como los ocurridos en el segmento de vehículos ligeros, donde la diversidad de conectores generó restricciones operativas y mayores costos de infraestructura.

Sobre esto se observó tras la revisión de la NOM-003-SEGOB-2011 y la NOM-034-SCT/SEDATU-2022, que aún no hay lineamientos definidos para la señalización de electrolineras. Se recomienda estandarizar las señales en carretera para su aplicación a nivel nacional en la RCF. Algunos ejemplos útiles se encuentran en la undécima edición del MUTCD (Manual on Uniform Traffic Control Devices), publicada en diciembre de 2023.

Por último, se debe prever la integración digital de las estaciones. Esto incluye no solo sistemas de gestión operativa y monitoreo, sino también interfaces abiertas para garantizar la interoperabilidad entre operadores, proveedores de servicios de movilidad y usuarios. Protocolos como OCPP y OCPI ya son ampliamente utilizados en otros contextos y pueden ser adoptados como base para facilitar el intercambio de información, habilitar el roaming y garantizar la transparencia en los servicios prestados.

9.4. Estrategias logísticas y modelos de operación

El despliegue de infraestructura de carga para vehículos eléctricos pesados no debe entenderse únicamente como una solución tecnológica, sino como parte de un ecosistema logístico más amplio. Para que esta transición sea viable, es necesario alinear los modelos de operación de las flotas con las características, limitaciones y oportunidades de la carga eléctrica.

Una propuesta ampliamente analizada es la carga nocturna, cuya operación permite que los vehículos se recarguen completamente durante las horas de inactividad, ayudando a alternar entre los horarios de operación y eliminando los tiempos muertos. Esta estrategia resulta especialmente adecuada para flotas con rutas predecibles y retornos diarios al punto base. En las entrevistas realizadas, varios actores destacaron la importancia de que esta modalidad no se desarrolle de manera aislada por cada operador, sino mediante esquemas de coordinación que permitan inversiones conjuntas o el desarrollo de modelos de servicio provistos por terceros especializados. Esta visión podría abrir oportunidades para nuevos actores interesados en operar la infraestructura de carga como servicio compartido entre múltiples flotas.

Sin embargo, no todas las operaciones pueden resolverse exclusivamente con carga en depósitos. Por ello, es importante considerar esquemas mixtos que incluyan carga en destino o en estaciones públicas ubicadas estratégicamente a lo largo de los corredores logísticos. En este contexto, la planeación de rutas debe considerar factores como la autonomía real de los vehículos, el tipo de carga transportada, y las condiciones operativas del trayecto.

La normativa vigente también debe ser parte de esta planificación. La NOM-087-SCT-2-2017, que regula los tiempos máximos de conducción y mínimos de descanso para operadores del autotransporte federal, puede convertirse en una herramienta útil si se sincroniza con los puntos de recarga. Esto permitiría optimizar los tiempos operativos, asegurando que los descansos obligatorios coincidan con momentos de recarga, evitando así pérdidas de eficiencia.

Otro componente clave es la digitalización. Herramientas de gestión de flotas y software de optimización de rutas permitirán maximizar el uso de la infraestructura de carga, planificar operaciones más eficientes y reducir costos. En las entrevistas se identificó que aún existe espacio para fortalecer la capacidad de los gerentes de flota respecto a estas herramientas. Se destacó que el éxito de la transición no depende únicamente de adquirir vehículos eléctricos pesados, sino de su integración efectiva en la operación diaria, lo cual requiere conocimientos técnicos, planificación y nuevas rutinas logísticas.

Asimismo, es necesario prever mecanismos de interoperabilidad entre operadores de puntos de carga (CPOs) y proveedores de servicios de movilidad eléctrica (eMSPs). La implementación de protocolos abiertos permitirá habilitar servicios como el roaming, la reserva de cargadores y el pago unificado, lo cual facilitará el uso de la infraestructura por parte de flotas heterogéneas y reducirá fricciones en la operación diaria.

La flexibilidad también será importante. En las fases tempranas de despliegue, es posible que la infraestructura pública no cubra todos los corredores o que no esté disponible en los horarios requeridos. Por ello, modelos como la carga nocturna pública, la carga compartida en centros logísticos o incluso soluciones móviles pueden ser opciones viables para ciertos segmentos de la industria.

En todos los casos, las decisiones logísticas deben alinearse con la realidad del mercado mexicano. Esto implica considerar factores como la variabilidad en la calidad de la red eléctrica, la disponibilidad de terrenos, las regulaciones locales y las capacidades técnicas de los operadores. La planeación debe hacerse en diálogo con los actores involucrados, asegurando que los modelos de operación propuestos sean prácticos, sostenibles y escalables.

9.5. Gobernanza, coordinación y monitoreo

Uno de los hallazgos más consistentes en los diálogos con actores del ecosistema es que existe disposición general para avanzar. Tanto operadores logísticos como proveedores de tecnología, autoridades locales, empresas eléctricas y otros actores relevantes coinciden en que el contexto es oportuno para iniciar el despliegue de infraestructura de carga para vehículos eléctricos pesados. Lo que está ausente no es la voluntad, sino la coordinación.

Actualmente, la falta de reglas claras, líneas de acción definidas y liderazgo institucional provoca incertidumbre y parálisis. Los distintos actores se muestran listos para actuar, pero no tienen claridad sobre con quién deben coordinarse, qué criterios deben seguir o qué estándares deben adoptar. Esta situación genera duplicidades, retrasos en la toma de decisiones y una fragmentación que impide construir un ecosistema funcional.

En las entrevistas, se reiteró que es el gobierno federal quien debe tomar el liderazgo para dar orden al proceso. Si bien no se identificó una única institución responsable, hubo consenso en que las señales deben venir desde el nivel nacional, mediante una visión articulada y sostenida. La ausencia de una hoja de ruta oficial y aprobada, como la Estrategia Nacional de Movilidad Eléctrica, fue señalada como uno de los factores que contribuyen a esta falta de dirección. Los actores esperan con urgencia que dicha estrategia establezca criterios, plazos y prioridades que puedan orientar a los sectores público y privado.

También se mencionaron experiencias internacionales que pueden servir de inspiración. Los casos de Chile y Portugal fueron citados como ejemplos de estrategias claras y coordinadas, mientras que Países Bajos y Alemania destacan por su capacidad de articular múltiples niveles de gobierno con el sector privado bajo una visión compartida. Aunque el contexto mexicano es distinto, estas referencias permiten identificar elementos replicables en materia de gobernanza y planificación.

Uno de los pasos urgentes para destrabar este proceso es definir quiénes deben asumir el rol de liderazgo en México. Esta definición debe incluir tanto un nivel técnico como uno político. Desde el plano técnico, se necesita una instancia con capacidad para definir criterios de interoperabilidad, estandarización y planificación. Desde lo político, se requiere una figura con legitimidad y facultades para articular actores, establecer prioridades y coordinar acciones a nivel nacional, estatal y municipal.

Finalmente, las limitadas herramientas en cuanto a gobernanza no solo son un obstáculo, sino un riesgo que puede afectar la sostenibilidad del proceso. Mientras no haya claridad institucional, los esfuerzos individuales seguirán siendo aislados y desarticulados. Lo que se requiere ahora no es convencer a los actores de que participen, sino construir las condiciones para que lo hagan de manera coordinada, eficiente y con reglas comunes.

9.6. Seguridad operativa, ciberseguridad y gestión de datos

La digitalización del ecosistema de carga conlleva beneficios claros en términos de eficiencia, monitoreo y control operativo. Sin embargo, también introduce riesgos asociados a la seguridad cibernética y la protección de datos. Estos aspectos no pueden considerarse secundarios: forman parte central de un despliegue seguro y confiable, especialmente cuando se trata de vehículos eléctricos pesados que operarán con cargadores de alta potencia conectados directamente a la red.

Las estaciones de carga suelen estar gestionadas por operadores de punto de carga (CPOs) a través de plataformas digitales, muchas de ellas conectadas a sistemas de gestión energética. Esta interconexión convierte a la infraestructura en un posible blanco para ataques informáticos. Una vulnerabilidad en los servidores de los CPOs podría no solo interrumpir el servicio, sino incluso comprometer la estabilidad del sistema eléctrico en ciertas regiones. En escenarios extremos, esto podría derivar en fallas masivas o apagones localizados.

Los CPOs tienen, por tanto, un rol fundamental en la protección del sistema. Deben implementar mecanismos de autenticación robustos para verificar la identidad de los conductores, proteger las credenciales de acceso y asegurar la integridad de los datos operativos (ElaadNL, 2023). Esto incluye medidas como cifrado, monitoreo activo de vulnerabilidades, auditorías periódicas y protocolos de respuesta ante incidentes.

Dado el estado incipiente del ecosistema en México, existe una oportunidad para actuar de forma preventiva. Es recomendable que se desarrollen estándares mínimos de ciberseguridad aplicables a la infraestructura de carga, y que estos sean definidos en colaboración con actores del sector. Convocar una mesa de trabajo técnica permitirá abordar temas como los niveles de protección requeridos, los riesgos potenciales, las especificaciones en procesos de compra de infraestructura y las responsabilidades de cada actor.

Otro componente clave es la interoperabilidad entre plataformas, que debe construirse sobre interfaces abiertas y seguras. Protocolos como OCPI y OCPP no solo permiten la compatibilidad entre distintos proveedores, sino que también establecen normas básicas para la transmisión segura de datos. Garantizar su implementación desde las primeras etapas reducirá riesgos y evitará desarrollos aislados o poco compatibles.

Por otro lado, contar con una red inteligente será esencial para acompañar el despliegue de cargadores de alta potencia. Estas redes permitirán modular la demanda, gestionar picos de consumo y evitar sobrecargas en puntos críticos. Esto es particularmente relevante en escenarios

donde los cargadores individuales puedan alcanzar potencias de entre 700 y 900 kilovatios, e incluso hasta 3.2 megavatios en fases más avanzadas. Sin una red inteligente y una planificación eléctrica adecuada, este nivel de carga no sería viable técnica ni económicamente.

Finalmente, es fundamental que el desarrollo de la infraestructura incluya planes de mantenimiento, actualización y evolución tecnológica. Las estaciones deben adaptarse a las nuevas exigencias del sector, evitando quedarse obsoletas en el corto plazo. Esto implica anticipar las tendencias, actualizar componentes críticos y mantener la seguridad tanto física como digital de los sistemas instalados.

9.7. Red eléctrica e integración energética

La infraestructura de carga para vehículos eléctricos pesados plantea retos importantes en términos de demanda energética, capacidad de conexión y coordinación con los operadores del sistema eléctrico. A diferencia de la carga de vehículos ligeros, los HDEV requieren potencias mucho mayores, con cargadores que van desde los 150 kilovatios hasta 3.2 megavatios por punto. Esto obliga a replantear las condiciones de acceso a la red, los tiempos de conexión y los criterios de distribución de la carga en el territorio.

Uno de los primeros desafíos es la planificación eléctrica. El despliegue de estaciones de carga debe estar estrechamente coordinado con la Comisión Federal de Electricidad (CFE) y con los organismos operadores de distribución regional. Esto implica compartir información sobre ubicación de sitios, estimaciones de demanda, cronogramas de instalación y requerimientos técnicos. Sin esta coordinación, pueden generarse retrasos significativos en la conexión de nuevos puntos o inversiones ineficientes en infraestructura que no estará lista cuando se requiera.

Durante las entrevistas, varios actores señalaron que una de las principales barreras en este proceso es la falta de certeza sobre los procedimientos para conectarse a la red. También se mencionaron demoras en la provisión del servicio por parte de CFE y restricciones derivadas del marco regulatorio actual. En particular, se destacó que las solicitudes de conexión para potencias elevadas (que son las necesarias para carga de vehículos pesados) enfrentan requisitos más complejos, lo cual retrasa o desincentiva el despliegue.

Frente a estos retos, algunos actores subrayaron la necesidad de identificar zonas donde ya existe capacidad instalada suficiente para alojar cargadores de alta potencia. En esas ubicaciones, el despliegue podría ser más rápido y menos costoso. Por el contrario, en áreas donde la red está limitada, será necesario prever ampliaciones, reforzamientos o incluso esquemas de generación distribuida.

La implementación de redes inteligentes se perfila como un componente estratégico para gestionar la transición. Estas redes permiten modular la demanda, gestionar picos de consumo, integrar fuentes renovables y optimizar el uso de la infraestructura existente. Además, facilitan el monitoreo en tiempo real del consumo, la detección de anomalías y el ajuste dinámico de la oferta según condiciones operativas.

En este sentido, varios entrevistados enfatizaron la importancia de que los propios centros de carga funcionen también como generadores mediante energías renovables y como espacios de almacenamiento energético. Esto no solo reduciría la dependencia de la red en momentos críticos, sino que permitiría que estos hubs actúen como reguladores locales del sistema, aportando estabilidad y eficiencia al conjunto.

Finalmente, se planteó la necesidad de revisar la estructura tarifaria para este tipo de infraestructura. Las tarifas actuales no siempre reflejan las condiciones particulares de la carga para HDEV, ni incentivan su desarrollo. Un marco tarifario específico, transparente y predecible podría reducir barreras económicas y facilitar decisiones de inversión por parte del sector privado.

9.8. Mantenimiento, soporte postventa y desarrollo industrial

El despliegue de infraestructura de carga para vehículos eléctricos pesados no puede entenderse de forma aislada del ecosistema productivo y de mantenimiento que lo respalda. Para que esta transición sea viable y sostenible, se requiere una visión integral que incluya desde el soporte técnico y la actualización tecnológica de los equipos hasta el fortalecimiento de las capacidades industriales nacionales en vehículos, autopartes y servicios especializados.

En el análisis técnico del documento, se enfatiza que el desarrollo de estaciones de carga debe considerar planes de mantenimiento y actualización para evitar que estas queden obsoletas a corto plazo. La anticipación de necesidades futuras y la alineación con las tendencias tecnológicas del sector son fundamentales para asegurar la compatibilidad con nuevas generaciones de vehículos, cargadores y sistemas de comunicación. Esto requiere no solo capacidad técnica, sino también mecanismos operativos y financieros para mantener la infraestructura vigente y funcional a lo largo del tiempo.

Paralelamente, se identifican retos similares desde la perspectiva del vehículo. Durante las entrevistas realizadas, varios actores plantearon preocupaciones concretas sobre la falta de servicios postventa confiables y disponibles a lo largo de los corredores de transporte. Operadores logísticos y posibles compradores señalaron que uno de los principales factores de resistencia a la adopción de camiones eléctricos es la incertidumbre sobre qué hacer en caso de fallas o necesidad de reparaciones, especialmente en rutas de larga distancia.

Estas preocupaciones no son menores. El modelo de operación del transporte de carga en México se basa en una alta exigencia de disponibilidad de los vehículos. Un camión detenido representa pérdidas económicas inmediatas, por lo que la confianza en el respaldo técnico es un factor decisivo en las decisiones de compra. Si no existen redes de soporte robustas, con refacciones disponibles y personal capacitado, el riesgo percibido puede superar los beneficios potenciales de la electrificación.

Este contexto pone de relieve la oportunidad estratégica que representa el desarrollo del ecosistema industrial mexicano en torno a la electromovilidad. México ya cuenta con capacidades destacadas en la producción de vehículos, fabricación de autopartes y ensamblaje. Estas fortalezas pueden potenciarse si se articulan con políticas industriales que incentiven la producción local de componentes para vehículos eléctricos pesados, estaciones de carga, sistemas de gestión y soluciones de mantenimiento predictivo.

El fortalecimiento de esta cadena de valor debe considerar tanto la fabricación de unidades como la disponibilidad de componentes críticos: conectores, baterías, módulos de carga, electrónica de potencia, software de monitoreo y soluciones de diagnóstico remoto. Además, el documento resalta la importancia de prever la adaptabilidad tecnológica de la infraestructura, lo cual también aplica al diseño de los propios vehículos y su compatibilidad con futuras evoluciones normativas y operativas.

A su vez, se requiere una red nacional de centros de servicio y mantenimiento distribuida a lo largo de los principales corredores logísticos. Esta red debe tener la capacidad de atender a vehículos

eléctricos de diferentes marcas y tecnologías, con esquemas de soporte multicliente, tanto públicos como privados. Asimismo, es fundamental establecer programas de formación continua para técnicos, operadores y personal de flotas, enfocados en las especificidades de la tecnología eléctrica y los protocolos de seguridad asociados.

En conjunto, el desarrollo del soporte postventa, la planificación del mantenimiento y el impulso a la producción local son elementos esenciales para garantizar no solo el funcionamiento del sistema, sino también su sostenibilidad económica, operativa y tecnológica en el largo plazo.

9.9. Conclusiones y reflexiones estratégicas para México

La transición hacia un sistema de transporte de carga electrificado en México no es un reto exclusivamente tecnológico, sino una transformación estructural que involucra planificación, regulación, gobernanza, capacidades industriales, energía y logística. La experiencia internacional ofrece lecciones valiosas, pero el camino mexicano debe construirse con base en sus propias condiciones, fortalezas y limitaciones.

A lo largo de este estudio se ha evidenciado que el despliegue de infraestructura de carga para vehículos eléctricos pesados requiere un enfoque integral. No basta con instalar cargadores; es necesario articular una estrategia nacional que coordine actores, integre la planificación energética con la operativa del transporte, fortalezca el ecosistema productivo y genere confianza en los usuarios y operadores. Esta visión debe ir más allá de la coyuntura y establecer las bases de un sistema robusto, interoperable, eficiente y justo.

Uno de los hallazgos centrales es que los actores del ecosistema están dispuestos a avanzar. Existen iniciativas privadas, capacidades técnicas y voluntad política en distintos niveles. Lo que falta es un marco común que articule esfuerzos, defina prioridades y reduzca la incertidumbre. En este sentido, contar con una Estrategia Nacional de Movilidad Eléctrica clara, operativa y con mecanismos de implementación concretos será un paso fundamental. Esta hoja de ruta debe fijar objetivos, establecer responsabilidades institucionales, definir criterios técnicos y orientar el desarrollo de infraestructura en función de la demanda proyectada y la viabilidad eléctrica.

Asimismo, México tiene una oportunidad única para vincular esta transición con su política industrial. El país cuenta con una base sólida en manufactura de vehículos y autopartes, que puede transformarse en un eje estratégico del cambio tecnológico si se promueven condiciones para la producción nacional de componentes clave. Esta capacidad puede extenderse también a servicios postventa, redes de mantenimiento, formación técnica y soporte logístico, todos esenciales para garantizar la continuidad operativa de las flotas eléctricas.

La coordinación con el sector energético será igualmente decisiva. La infraestructura de carga para HDEV demanda potencias elevadas, planificación anticipada y esquemas de red inteligente. La integración con generación renovable y almacenamiento local puede ayudar a mitigar picos de demanda y asegurar precios competitivos. Esta sinergia entre movilidad eléctrica y transición energética debe formar parte del diseño estructural del sistema.

Otro elemento clave será priorizar el despliegue en corredores estratégicos, no solo por volumen de carga, sino por su relevancia operativa y potencial impacto internacional. Los corredores hacia California y Texas, por ejemplo, pueden convertirse en zonas piloto para probar tecnologías, modelos de operación y esquemas de interoperabilidad. Estas experiencias podrían adaptarse luego a otros puntos de la Red Carretera Federal.

Finalmente, es esencial asumir que esta transición será progresiva, no inmediata. La construcción de capacidades, la adaptación normativa y el cambio cultural en el sector logístico tomarán tiempo. Pero postergar las decisiones también tiene costos. Por eso, comenzar con pasos medidos, basados en datos, con participación multisectorial y visión a largo plazo es la vía más segura para avanzar.

México tiene el potencial, la industria y los actores listos. El reto ahora es pasar del interés a la acción, de las piezas sueltas a una estrategia coordinada, y de la visión a los primeros proyectos concretos que inicien este nuevo capítulo en el transporte pesado nacional.

10. Referencias

A continuación se indican las fuentes de información consultadas para la elaboración de este informe.

- ACT Research. (27 de Agosto de 2024). *Equipment finance News*. Obtenido de <https://equipmentfinancenews.com/news/transportation/heavy-duty-evs-face-uphill-climb/>
- Agenda Laadinfra. (15 de Junio de 2023). *Laadlocaties trucks online beschikbaar - Waar kan ik publiek laden met mijn e-truck?* Obtenido de <https://www.agendalaadinfrastructuur.nl/nieuws/2493672.aspx?t=Laadlocaties-trucks-online-beschikbaar-Waar-kan-ik-publiek-laden-met-mijn-e-truck>
- AMIA. (2022). *Asociación Mexicana de la Industria Automotriz. Transición a la electromovilidad en México*. Obtenido de <https://amia.com.mx/wp-content/uploads/2022/03/electromovilidad28022022-V2.pdf>
- Asamblea Legislativa de la República de Costa Rica. (5 de Diciembre de 2017). *Ley N° 9518 - Ley de incentivos y promoción para el Transporte Eléctrico*. Obtenido de <https://www.ecolex.org/details/legislation/ley-no-9518-ley-de-incentivos-y-promocion-para-el-transporte-electrico-lex-faoc177932/>
- BlueGreen Alliance. (27 de Enero de 2023). *A User Guide to the Bipartisan Infrastructure Law (BIL)*. Obtenido de Federal Resource Center: [https://www.bluegreenalliance.org/site/a-user-guide-to-the-bipartisan-infrastructure-law-bil/#:~:text=The%20Bipartisan%20Infrastructure%20Law%20\(BIL\)%E2%80%94also%20known%20as%20the%20law%20on%20November%2015%2C%202021.](https://www.bluegreenalliance.org/site/a-user-guide-to-the-bipartisan-infrastructure-law-bil/#:~:text=The%20Bipartisan%20Infrastructure%20Law%20(BIL)%E2%80%94also%20known%20as%20the%20law%20on%20November%2015%2C%202021.)
- BY Innovation. (26 de Diciembre de 2023). *European Clean Transport Network*. Obtenido de <https://byinnovation.eu/european-clean-transport-network/>
- California Air Resources Board. (3 de Julio de 2024). *Advanced Clean Fleets Regulation Overview*. Sacramento, California, USA.
- California Energy Commission. (s.f.). *Clean Transportation Program Overview*. Obtenido de <https://www.energy.ca.gov/programs-and-topics/programs/clean-transportation-program/clean-transportation-program-overview>
- CALSTART . (2022). *Drive to Zero's Zero-emission Technology Inventory (ZETI)*. Obtenido de <https://globaldrivetozero.org/tools/zeti/>
- CALSTART. (Enero de 2023). *Trayectorias tecnológicas y comerciales para la adopción de vehículos medianos y pesados de cero emisiones en México*. Obtenido de https://calstart.org/wp-content/uploads/2023/01/CALSTART_Pathways_ZEMHDV_Mexico_ES-1.pdf
- CALSTART. (2024). *States Pave the Way for ZET Adoption. Assessing the Impact of ACT and ACF through 2030*. California: California Air Resources Board Clean Transportation. Obtenido de <https://calstart.org/act-acf-impact-on-zet-adoption/>
- CALSTART. (2025). *Drive to Zero's Zero-emission Technology Inventory (ZETI) Tool Version 9.0*. Obtenido de <https://globaldrivetozero.org/tools/zeti/>
- Ceva Logistics. (16 de Mayo de 2024). *CEVA Logistics, ENGIE, SANEF kick off proof of concept for low-carbon, long-distance road transport in Europe*. Obtenido de <https://www.cevalogistics.com/en/news-and-media/newsroom/ectn-proof-of-concept-for-low-carbon>
- ChargeLab. (6 de Julio de 2023). *OCPI vs OCPP: Everything you need to know about charge point protocols*. Obtenido de How OCPI & OCPP unlock interoperability, and why it matters: <https://chargelab.co/blog/ocpi-vs-ocpp>
- CharIn. (24 de Noviembre de 2022). *CharIn Whitepaper Megawatt Charging System (MCS)*. Obtenido de Recommendations and requirements for MCS related standards bodies and solution suppliers: https://www.charin.global/media/pages/technology/knowledge-base/c708ba3361-1670238823/whitepaper_megawatt_charging_system_1.0.pdf
- Comisión Europea. (14 de Julio de 2021). *REGLAMENTO DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO relativo a la implantación de una infraestructura para los combustibles alternativos y por el que se deroga la Directiva 2014/94/UE del Parlamento Europeo y del Cons*. Obtenido de <https://eur-lex.europa.eu/legal->

- content/ES/TXT/HTML/?uri=CELEX:52021PC0559#:~:text=La%20Directiva%202014%2F94%2FUE%2C%20relativa%20a%20la%20implantaci%C3%B3n,esta%20infraestructura%20en%20la%20Uni%C3%B3n.
- Congreso de la República de Colombia. (2019). *Ley 1964 de 2019, por medio de la cual se promueve el uso de vehículos eléctricos en Colombia y se dictan otras disposiciones*. Obtenido de Diario Oficial No. 51.176.: <https://www.suin-juriscol.gov.co/viewDocument.asp?id=30036636>
- Congreso de la República de Colombia. (2019). *Ley 1972 de 2019*. Obtenido de <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/06/ley-1972-2019.pdf>
- Congreso de la República de Colombia. (2021). *Ley 2099 de 2021. Por medio de la cual se dictan disposiciones para la transición energética, la dinamización del mercado energético, la reactivación económica del país y se dictan otras disposiciones*. Obtenido de <https://www.suin-juriscol.gov.co/viewDocument.asp?id=30041997>
- Congreso Nacional de Chile. (Febrero de 2021). *Ley de Eficiencia Energética (Ley 21305, 2021)*. . Obtenido de Biblioteca del Congreso Nacional de Chile: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1155887>
- Congreso Nacional de Chile. (Junio de 2022). *Ley 21455. Ley Marco de Cambio Climático*. Obtenido de Biblioteca del Congreso Nacional de Chile: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1177286>
- Consejo de la Unión Europea. (25 de Julio de 2023). *Infraestructura para los combustibles alternativos: el Consejo adopta un nuevo Reglamento para aumentar las estaciones de recarga y repostaje en toda Europa*. Obtenido de <https://www.consilium.europa.eu/es/press/press-releases/2023/07/25/alternative-fuels-infrastructure-council-adopts-new-law-for-more-recharging-and-refuelling-stations-across-europe/>
- CRE. (2024). *Diario oficial de la federeación. ACUERDO Núm. A/108/2024 por el que la Comisión Reguladora de Energía expide las disposiciones administrativas de carácter general en materia de electromovilidad para la integración de infraestructura de carga de EVs*. Obtenido de https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5738646&fecha=10/09/
- CRE, C. R. (25 de Septiembre de 2024). *Gobierno de México*. Obtenido de https://www.gob.mx/cre/prensa/presenta-cre-la-primera-regulacion-de-electromovilidad-en-mexico?idiom=es&utm_
- CRE, C. R. (10 de Septiembre de 2024). *Gobierno de México*. Obtenido de https://www.gob.mx/cre/prensa/expide-cre-las-disposiciones-administrativas-de-caracter-general-en-materia-de-electromovilidad-mediante-el-acuerdo-a-108-2024?idiom=es&utm_
- DGST. (2023). *Mapas Temáticos con la Información Operacional en la Red de Ejes de Transporte*. Obtenido de TDPA AÑO 2023. [Archivo PDF].: https://www.sct.gob.mx/fileadmin/DireccionesGrales/DGST/Mapas_Tematicos/TDPA_PRO MEDIO_PONDERADO_2023.pdf
- DNP. (2022). *Identificación de modelos de negocio y estructuración de hojas de ruta de implementación, para el desarrollo de la red de estaciones de carga pública a nivel nacional y la estructuración de proyectos piloto en Colombia*. Bogotá: DNP.
- DNP. (2023). *Bases del Plan Nacional de Desarrollo 2022-2026 Colombia Potencia Mundial de la Vida*. Bogotá D.C: Departamento Nacional de Planeación (DNP).
- DNP. (2023). *Bases del PND 2022-2026 Colombia Potencia Mundial de la Vida*. Bogotá: Departamento Nacional de Planeación. Obtenido de Departamento Nacional de Planeación.
- DPL News. (19 de Febrero de 2024). *Diputada propone crear una red de carga para vehículos eléctricos en Costa Rica*. Obtenido de <https://dplnews.com/diputada-propone-crear-una-red-de-carga-para-vehiculos-electricos-en-costarica/>
- El País. (7 de Enero de 2025). *Chile pisa el acelerador en la compra de automóviles eléctricos: sus ventas aumentaron en 183% en un año*. Obtenido de <https://elpais.com/chile/2025-01-08/chile-pisa-el-acelerador-en-la-compra-de-automoviles-electricos-sus-ventas-aumentaron-en-183-en-un-ano.html>
- ElaadNL. (2023). *Cyber security, A safe and sustainable energy network*. Obtenido de <https://elaad.nl/en/onderwerpen/cyber-security/>

- Electric Trucks Now. (2024). *States that have signed the 100% zero-emission truck MOU and are working on adopting the advanced clean trucks rule*. Obtenido de <https://www.electrictrucksnow.com/states>
- Electrification Coalition. (s.f.). *Inflation Reduction Act & EVs*. Obtenido de Federal Policy: <https://electrificationcoalition.org/work/federal-ev-policy/inflation-reduction-act/>
- EMA. (2025). *Barómetro Cuarto Trimestre 2024, Estatus de la electromovilidad en México*. CDMX.
- EPRI. (2019). *Interoperability of Public Electric Vehicle Charging Infrastructure*. Palo Alto, California 94304: Electric Power Research Institute.
- European Hydrogen Observatory. (28 de Junio de 2024). *Alternative Fuels Infrastructure Regulation*. Obtenido de <https://observatory.clean-hydrogen.europa.eu/eu-policy/alternative-fuels-infrastructure-regulation>
- EVBoosters. (13 de Enero de 2025). *Outlook 2025 Europe's Heavy Duty Charging Infrastructure for electric trucks*. Obtenido de [https://evboosters.com/ev-charging-news/outlook-2025-europes-heavy-duty-charging-infrastructure-for-electric-trucks/#:~:text=Heavy%2Dduty%20vehicle%20\(HDV\),dominate%2015%25%20of%20the%20fleet.](https://evboosters.com/ev-charging-news/outlook-2025-europes-heavy-duty-charging-infrastructure-for-electric-trucks/#:~:text=Heavy%2Dduty%20vehicle%20(HDV),dominate%2015%25%20of%20the%20fleet.)
- FHWA. (28 de Febrero de 2023). *National Electric Vehicle Infrastructure Standards and Requirements. A Rule by the Federal Highway Administration*. Obtenido de <https://www.federalregister.gov/d/2023-03500>
- FHWA. (30 de Enero de 2025). *National Electric Vehicle Infrastructure Formula Program*. Obtenido de United States Federal Highway administration: https://www.fhwa.dot.gov/infrastructure-investment-and-jobs-act/nevi_formula_program.cfm?utm
- Fraunhofer. (14 de Marzo de 2024). *Electric trucks: What has to be considered for the nationwide expansion of fast-charging locations?* Obtenido de Fraunhofer Institute For Systems And Innovation Research ISI: <https://www.isi.fraunhofer.de/en/presse/2024/presseinfo-09-e-lkw-schnelllade-standorte.html>
- Fraunhofer ISI. (Marzo de 2024). *Megawatt charging in long-haul trucking: First findings on challenges and solutions*. Obtenido de Bundesministerium für Digitales und Verkehr & Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research ISI: https://hochleistungsladen-lkw.de/hola-wAssets/docs/publikationen/HoLa_LessonsLearnt-en.pdf
- Gil, C. M. (2024). *Recomendaciones para desarrollar la infraestructura de carga de la flota de camiones en Colombia (Policy Brief Series No. 5)*. Obtenido de Giro Zero: https://girozero.uniandes.edu.co/system/files/2024-09/docs/20240901_Policy_5.pdf
- GIREVE. (8 de Enero de 2025). *Beyond EV Charging 13 – HDV Charging January update*. Obtenido de <https://www.gireve.com/beyond-ev-charging-13/>
- Giro Limpio. (2025). *Estadísticas Giro Limpio: Transporte de Carga Terrestre*. Obtenido de Dashboard de Transporte de carga: <https://www.agenciase.org/2023/08/16/agenciase-publica-primer-dashboard-interactivo-estadisticas-giro-limpio-transporte-de-carga-terrestre/>
- Gobierno de la Ciudad de México. (2025). *Vehículos híbridos y eléctricos. Impuesto sobre tenencia o uso de vehículos 2025*. Obtenido de https://cdmxassets.s3.amazonaws.com/media/files-pdf/control-vehicular/2025/HIBR_ELEC_2025.pdf
- Gobierno del Bicentenario. (25 de Febrero de 2020). *Costa Rica es el primer país de la región con una red nacional de carga para vehículos eléctricos*. Obtenido de <https://presidencia.gobiernocarlosalvarado.cr/comunicados/2020/02/costa-rica-es-el-primer-pais-de-la-region-con-una-red-nacional-de-carga-para-vehiculos-electricos/>
- Grandview research. (2023). *Heavy-duty Electric Trucks Market Size, Share & Trends Analysis Report By Vehicle Class, By Propulsion Type, By Application, By Region, And Segment Forecasts, 2024 - 2030*. San Francisco, California: Grandview research.
- Heliox Energy. (2022). *Electrifying the charge ahead, How eTrucks can join the transition on the road*. The Netherlands: Heliox B.V.
- Heliox-Energy. (12 de Septiembre de 2023). *Heliox-Energy, Nuevas normas de recarga de vehículos eléctricos en EE.UU*. Obtenido de <https://es.heliox-energy.com/blog/usa-new-ev-charging-standards>
- Heufemann, N. (17 de Marzo de 2025). *Sotraser avanza en electromovilidad con la mayor flota de camiones eléctricos de Sudamérica*. Obtenido de Mercado Mayorista:

- <https://mercadomayorista.lun.com/edicion-especial-vehiculos-comerciales/2025/03/17/sotraser-avanza-en-electromovilidad-con.html>
- Hochleistungsladen lkw fernverkehr. (2024). *HoLa – High performance charging for long-haul trucking*. Obtenido de <https://hochleistungsladen-lkw.de/hola-de/projekt/>
- ICCT. (2023). *Near-term MHDV infrastructure deployment to support zero-emission Medium- and Heavy-Duty vehicles in the United States*. Washington, DC: The International Council on Clean Transportation (ICCT).
- ICCT. (2024). *European Heavy Duty vehicle Market Development Quarterly*. Obtenido de https://theicct.org/wp-content/uploads/2024/12/ID-282—EU-R2Z-Q3_spotlight_final-1.pdf
- IEA. (2023). *Global EV Outlook 2023*. International Energy Agency.
- IMT. (2024). *Estudio sobre los sistemas de recarga y tecnologías para la electrificación del autotransporte*. Querétaro, México: Publicación Técnica No. 850.
- InduAmbiente. (12 de marzo de 2025). *Sotraser avanza en electromovilidad con la mayor flota de camiones eléctricos de Sudamérica*. Obtenido de InduAmbiente: <https://www.induambiente.com/firman-convenio-para-impulsar-el-transporte-pesado-de-carga-sin-emisiones-en-chile>
- INECC. (2021). *Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero 2020*. Obtenido de <https://datos.gob.mx/busca/dataset/inventario-nacional-de-emisiones-de-gases-y-compuestos-de-efecto-invernadero-inegycei>
- INEGI. (2024). *Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática*. Obtenido de Registro administrativo de la industria automotriz de vehículos: <https://www.inegi.org.mx/datosprimarios/iavp/>
- INEGI. (2024). Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, Venta al menudeo y mayoreo de vehículos pesados por marca, segmento y fuente de energía. México.
- Joint Office. (Junio de 2024). *Physical Safety and Security at Electric Vehicle Charging Sites*. Obtenido de Joint Office of Energy and Transportation: <https://driveelectric.gov/files/physical-site-security.pdf>
- Joint Office of Energy and Transportation. (2024). *National Zero-Emission Freight Corridor Strategy*. Joint Office of Energy and Transportation.
- Kempower. (10 de Enero de 2024). *Navigating AFIR: A guide to compliant electric vehicle charging solutions*. Obtenido de <https://kempower.com/afir/>
- Latam Mobility. (13 de Febrero de 2025). *Flotas comerciales eléctricas en México: ¿Dónde estamos parados y hacia dónde vamos?* Obtenido de <https://latamobility.com/opinion-flotas-comerciales-electricas-en-mexico-donde-estamos-parados-y-hacia-donde-vamos/>
- Lindholmen Science Park. (s.f.). *E-Charge, Electrifying heavy long-haul truck transport*. Obtenido de <https://www.lindholmen.se/en/project/e-charge>
- Metropolitan Transportation Commission. (Noviembre de 2021). *Bipartisan Infrastructure Law (BIL)*. Obtenido de <https://mtc.ca.gov/advocacy/federal-advocacy/bipartisan-infrastructure-law-bil>
- Milence. (s.f.). *Building Europe's leading charging network for heavy-duty transport*. Recuperado el 10 de Marzo de 2025, de <https://milence.com/>
- Minambiente. (s.f.). *Estrategia Nacional de Movilidad Eléctrica*. Recuperado el 27 de Febrero de 2025, de ENME: <https://archivo.minambiente.gov.co/index.php/estrategia-nacional-de-movilidad-electrica-enme>
- Ministerio de ambiente. (2020). *Actualización de la Contribución Determinada a Nivel*. Gobierno de Colombia. Obtenido de <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/10/informe-actualizacion-contribucion-determinada-Colombia-ndc-2020.pdf>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2020). *Estrategia Nacional de Movilidad Eléctrica (ENME)*. Obtenido de Gobierno de Colombia: <https://archivo.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/pdf/Estrategia-Nacional-de-Movilidad-Electrica-enme-minambiente.pdf>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (3 de Julio de 2020). *Resolución 40177 de 2020*. Obtenido de <https://www.minambiente.gov.co/documento-entidad/resolucion-40177-de-2020/>

- Ministerio de Ambiente y Energía . (24 de Febrero de 2019). *Dirección de Cambio Climático*. Obtenido de Gobierno de Costa Rica: <https://cambioclimatico.go.cr/wp-content/uploads/2019/02/PLAN.pdf>
- Ministerio de Ambiente y Energía de Costa Rica. (Febrero de 2019). *Plan Nacional de Transporte Eléctrico (PNTE)*. Obtenido de <http://www.pgrweb.go.cr/DocsDescargar/Normas/No%20DE-41579/Version1/PlanTranspElect.pdf>
- Ministerio de energía de Chile. (Noviembre de 2021). *ESTRATEGIA NACIONAL DE ELECTROMOVILIDAD*. Obtenido de <https://energia.gob.cl/consultas-publicas/estrategia-nacional-de-electromovilidad>
- Ministerio de energía de Chile. (s.f.). *Plataforma de electromovilidad*. Obtenido de <https://energia.gob.cl/electromovilidad/sistemas-de-carga/interoperabilidad/las-4-interacciones-de-una-red-interoperable>
- Ministerio de Energía de Chile. (s.f.). *Sistemas de Carga: Interoperabilidad*. Obtenido de <https://energia.gob.cl/electromovilidad/sistemas-de-carga/interoperabilidad/actores-de-la-interoperabilidad>
- Ministerio de Energía. (s.f.). *Plataforma de Electromovilidad*. Obtenido de <https://energia.gob.cl/electromovilidad/reglamentacion>
- Ministerio de Minas y Energía. (2021). *Resolución 40223 de 2021*. Obtenido de <https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=114758>
- Ministerio de Minas y Energía. (9 de Abril de 2024). *Resolución 40123 de 2024. Por la cual se establecen los requisitos para la interoperabilidad de las estaciones de carga pública para vehículos eléctricos e híbridos enchufables*. Obtenido de Diario Oficial AÑO CLIX NO. 52.722: [https://www.suin-juricol.gov.co/clp/contenidos.dll/Resolucion/30051458#:~:text=RESOLUCION%2040123%20DE%202024&text=\(abril%2009\)-,Por%20la%20cual%20se%20establecen%20las%20condiciones%20de%20interoperabilidad%20para,veh%C3%ADculos%20el%C3%A9ctricos%20e%20](https://www.suin-juricol.gov.co/clp/contenidos.dll/Resolucion/30051458#:~:text=RESOLUCION%2040123%20DE%202024&text=(abril%2009)-,Por%20la%20cual%20se%20establecen%20las%20condiciones%20de%20interoperabilidad%20para,veh%C3%ADculos%20el%C3%A9ctricos%20e%20)
- Ministerio de Transporte de Colombia. (2022). *Estrategia Nacional de Transporte Sostenible (ENTS)*. Bogotá D.C.
- Mobility Portal Latam. (18 de Septiembre de 2023). *¿Qué porcentaje de ventas representan los vehículos eléctricos sobre el parque automotriz?* Obtenido de <https://mobilityportal.lat/porcentaje-ventas-total-parque-automotriz/>
- Mobility Portal Latam. (20 de Diciembre de 2024). *Flota de camiones eléctricos y centro de carga más grande de Sudamérica costó USD 11 millones*. Obtenido de <https://mobilityportal.lat/camiones-electricos-carga-11-millones>
- Move Latam. (2023). *Interoperabilidad para la recarga de vehículos eléctricos en América Latina y en el caribe. Guía práctica de recomendaciones*.
- NAL. (2022). *Dutch National Charging Infrastructure Agenda (NAL) Brochure*. Netherlands: Dutch National Charging Infrastructure Agenda.
- Nederland Elektrisch. (s.f.). *Charging infrastructure*. Recuperado el 12 de Marzo de 2025, de <https://nederlandelektrisch.nl/charging-infrastructure>
- NOW GmbH. (7 de Marzo de 2024). *Research project provides initial recommendations for the nationwide development of fast-charging locations*. Obtenido de Fast-charging for e-trucks: Interim report on HoLa project published: <https://www.now-gmbh.de/en/news/pressreleases/fast-charging-for-e-trucks-interim-report-on-hola-project-published/>
- NREL. (15 de Enero de 2025). *The Dawn of Electric Trucking Calls for High-Power Charging*. Obtenido de National Renewable Energy Laboratory : <https://www.nrel.gov/news/features/2025/the-dawn-of-electric-trucking-calls-for-high-power-charging.html>
- NYSERDA. (Noviembre de 2012). *Siting and Design Guidelines for Electric Vehicle Supply Equipment*. Obtenido de NYSERDA, & Transportation and Climate Initiative: https://www.transportationandclimate.org/sites/default/files/EV_Siting_and_Design_Guidelines.pdf

- Office of Energy Efficiency & Renewable Energy. (15 de Enero de 2025). *DOE Invests \$68 Million in Innovative Heavy-Duty Electric Vehicle Charging Solutions*. USA: US Department of Energy.
- Parlamento Europeo. (19 de Octubre de 2022). *El PE quiere cargadores para vehículos eléctricos cada 60 km*. Obtenido de <https://www.europarl.europa.eu/news/es/press-room/20221014IPR43206/el-pe-quiere-cargadores-para-vehiculos-electricos-cada-60-km>
- Poder ejecutivo de Costa Rica. (2018). *Reglamento de incentivos para el transporte eléctrico N° 41092-MINAE-H-MOPT*. Obtenido de Sistema Costarricense de Información Jurídica: https://pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?nValor1=1&nValor2=86581&nValor3=0¶m1=NRTC&strTipM=TC&utm
- Rackliffe, G. (Junio de 2022). Preparing grids to meet the growing demand for EV fleet Charging, Spotify podcast. (P. Pulse, Entrevistador)
- Reuters. (20 de Enero de 2025). *Trump revokes Biden 50% EV target, freezes unspent charging funds*. Obtenido de <https://www.reuters.com/business/autos-transportation/trump-revokes-biden-order-that-set-50-ev-target-2030-2025-01-21/>
- RFF. (31 de Mayo de 2023). *Zero-Emission Trucks and the Inflation Reduction Act: Tax Credits for Clean Commercial Vehicles and Electric Vehicle Charging Infrastructure*. Obtenido de Resources For The Future: <https://www.resources.org/special-series-electrifying-large-vehicles/zero-emission-trucks-and-the-inflation-reduction-act-tax-credits-for-clean-commercial-vehicles-and-electric-vehicle-charging-infrastructure/>
- RVO. (18 de Marzo de 2025). *Aanschafsubsidie Zero-Emissie Trucks (AanZET)*. Obtenido de Rijksdienst voor Ondernemend Nederland: <https://www.rvo.nl/subsidies-financiering/aanzet#voorwaarden>
- Sánchez Devanny. (10 de Julio de 2023). Estrategia Nacional de Movilidad Eléctrica. CDMX, México.
- Sanef. (9 de Marzo de 2023). *CEVA Logistics, ENGIE and SANEF launch an alliance to decarbonize road freight transport*. Obtenido de <https://www.groupe.sanef.com/en/actualite/alliance-ECTN>
- Schwarz Simão, M. V. (2025). *Regulations and standards for electric vehicle charging infrastructure: A comparative analysis between Brazil and leading countries in electromobility*. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 73, 104119. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.seta.2024.104119>
- Transport Topics. (21 de Enero de 2025). *Trump Orders Removal of EV-Favoring Policies and Subsidies*. Obtenido de <https://www.ttnews.com/articles/trump-removal-ev-policies>
- TÜV Rheinland. (s.f.). *EU New Battery Regulation (EU) 2023/1542*. Obtenido de <https://www.tuv.com/landingpage/en/eu-new-battery-regulation-eu-2023-1542/>
- U.S Department of Energy. (Septiembre de 2023). *Inflation Reduction Act of 2022*. Obtenido de <https://www.energy.gov/lpo/inflation-reduction-act-2022>
- Unión Europea. (2023). *Reglamento (UE) 2023/1804 del Parlamento Europeo y del Consejo de 13 de septiembre de 2023 relativo al despliegue de infraestructuras para los combustibles alternativos*. Obtenido de Diario Oficial de la Unión Europea, L 234, 1-56: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/HTML/?uri=CELEX:32023R1804>
- US Department of Energy. (s.f.). *State Planning and Funding for Electric Vehicle Charging Infrastructure*. Obtenido de Alternative Fuels Data Centers: <https://afdc.energy.gov/fuels/electricity-infrastructure-state-planning>
- US EPA. (11 de Diciembre de 2024). *United States Environmental Protection Agency*. Obtenido de <https://www.epa.gov/newsreleases/la-administracion-biden-harris-anuncia-sobre-735-millones-en-selecciones-para?utm>
- USDOE. (2024). *High-Power Electric Vehicle Charging Hub Integration Platform (eCHIP)*. Obtenido de <https://www.nrel.gov/docs/fy24osti/86326.pdf>
- USDOT. (30 de Septiembre de 2024). *United States Department of Transportation*. Obtenido de <https://www.transportation.gov/rural/grant-toolkit/charging-and-fueling-infrastructure-grant-program>
- Vinnova. (3 de Febrero de 2025). *E-Charge: System demonstration of electrified long-haul transports*. Obtenido de <https://www.vinnova.se/en/p/e-charge-system-demonstration-of-electrified-long-haul-transport/>

- Virta. (2025). *Increase coverage and EV driver reach with EV roaming*. Obtenido de <https://www.virta.global/charging-solution/roaming#:~:text=Acceso%20a%20miles%20de%20puntos,a%20sus%20estaciones%20de%20recarga>.
- Wilmsmeier G, G. C. (2024). *Recomendaciones para desarrollar la infraestructura de carga de la flota de camiones en Colombia*. Bogotá D.C: GiroZero.
- Yang, M. (7 de Febrero de 2025). *The Guardian*. Obtenido de Trump administration suspends \$5bn electric vehicle charging program: <https://www.theguardian.com/us-news/2025/feb/07/trump-electric-vehicle-charging-station-program>